



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV GEOTECHNIKY**

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

**VÝPOČTOVÁ ÚNOSNOST PILOTOVÝCH  
ZÁKLADŮ**

BEARING CAPACITY OF PILE FOUNDATIONS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jan Michalčák**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. VĚRA GLISNÍKOVÁ, CSc.**

**BRNO 2018**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav geotechniky

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Jan Michalčák
<b>Název</b>	Výpočtová únosnost pilotových základů
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Věra Glisníková, CSc.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2017
<b>Datum odevzdání</b>	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

---

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **PODKLADY A LITERATURA**

Podklady pro zpracování diplomové práce budou studentovi předány samostatně.  
Masopust, J.: Vrtané piloty. Čeněk a Ježek, Praha, 1994  
Masopust, J.: Speciální zakládání staveb - 1. díl, AN CERM, s.r.o., Brno, 2004  
Masopust, J.: Navrhování základových a pažících konstrukcí. Příručka k ČSN EN 1997.  
Informační centrum ČKAIT, Praha, 2012  
Reese, L.C. et al: Analysis and design of shallow and deep foundations, J. Wiley & sons, USA, 2006

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Zakládání staveb na pilotách představuje nejrozšířenější metodu hlubinného zakládání staveb. Úkolem autora diplomové práce je v teoretické části zpracovat software pro výpočet únosnosti pilot. V praktické části diplomové práce dále získané poznatky aplikovat na konkrétní případ pilotového založení ve složitých geologických podmínkách. Při vypracovávání diplomové práce (DP) vycházejte ze zadaných podkladů, pokynů vedoucího DP a odborné literatury.

## **STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Věra Glisníková, CSc.  
Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Práce pojednává o výpočtu založení pilotových základů. V první části se autor zaměřuje na numerickou aplikaci MKP metody pro výpočet vnitřních sil na pilotě a softwarovou implementaci návrhu založení pilotou dle Masopusta (2. Mezní stav). Druhá, praktická část využívá předchozích poznatků a vytvořeného programu pro výpočet založení mostního pilíře na obchvatu kolem Opavy.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

MKP, metoda konečných prvků, python, PyQt5, založení, pilota, obchvat, Opava

## **ABSTRACT**

The thesis deals with calculation of foundation of pilot bases. In the first part, the author focuses on the numerical application of the Final Element Method for calculating the internal forces on the pilot and the software implementation of the proposal by the Masopust pilot (2nd Limit State). The second, practical part uses previous knowledge and created program to calculate the foundation of the bridge pillar on the bypass around Opava.

## **KEYWORDS**

FEM, finite element method, Python, PyQt5, foundations, pilot, bypass, Opava

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Jan Michalčák *Výpočtová únosnost pilotových základů*. Brno, 2018 48 s., 12 s. příl.  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav  
geotechniky. Vedoucí práce Ing. Věra Glisníková, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2018

---

Bc. Jan Michalčák  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Věře Glisníkové, CSc. Za odborné vedení, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

V Brně dne 11. 1. 2018

---

Bc. Jan Michalčák  
autor práce

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>13</b>
<b>1 Teoretická část diplomové práce</b>	<b>14</b>
1.1 Teorie výpočtů pilot . . . . .	14
1.1.1 Výpočet piloty dle EN 1997, 1.MS . . . . .	14
1.1.2 Výpočtová únosnost pilot hloubených do stlačitelného podloží dle Masopusta, 2.MS . . . . .	14
1.1.3 Prutová teorie MKP . . . . .	18
1.2 Program . . . . .	22
1.2.1 Program pro odvození nedostupných vzorců z dat . . . . .	22
1.2.2 Odvození vzorců pro numerický výpočet . . . . .	22
1.2.3 GUI - grafické rozhraní uživatele . . . . .	25
1.2.4 MKP procesor . . . . .	25
1.3 Výsledná kompilace programu . . . . .	32
<b>2 Praktická část diplomové práce</b>	<b>33</b>
2.1 Situace . . . . .	33
2.2 Geologické poměry a IGP . . . . .	33
2.3 Zatížení a statický model horní stavby . . . . .	34
2.3.1 Zatížení . . . . .	34
2.3.2 Statický model . . . . .	35
2.4 Návrh a posouzení založení . . . . .	37
2.4.1 Návrh rozměrů . . . . .	37
2.4.2 Vstupní parametry zemin . . . . .	37
2.4.3 Výpočet únosnosti piloty . . . . .	37
2.4.4 Výpočet vertikální únosnosti dle 2.MS . . . . .	37
2.4.5 Horizontální únosnost pilot . . . . .	38
2.4.6 Zhodnocení výstupů . . . . .	42
<b>3 Závěr</b>	<b>44</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratek</b>	<b>46</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>48</b>



<b>A</b>	<b>Geologicko-inženýrský průzkum</b>	<b>49</b>
A.1	Geotechnický profil vrtu JV-164 . . . . .	49
A.2	Interpretace výsledků dynamické penetrace DP-163 . . . . .	50
A.3	Interpretace výsledků dynamické penetrace DP-165 . . . . .	51
<b>B</b>	<b>Výstupy z laboratorních zkoušek</b>	<b>52</b>
B.1	Mechanické vlastnosti zemin . . . . .	52
B.2	Fyzikální vlastnosti zemin . . . . .	53
B.3	Stanovení stlačitelnosti v edometru . . . . .	54
B.4	Krabicová smyková zkouška str. 1/3 . . . . .	55
B.5	Krabicová smyková zkouška str. 2/3 . . . . .	56
B.6	Krabicová smyková zkouška str. 3/3 . . . . .	57
<b>C</b>	<b>Zatížení</b>	<b>58</b>
C.1	Spojité nosník - mostovka . . . . .	58
C.2	Konzole . . . . .	59
<b>D</b>	<b>Obsah přiloženého archivu</b>	<b>60</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Statické schéma výpočtu únosnosti osamělé piloty dle 1.MS . . . . .	14
1.2	Model uzlových neznámých pro ohýbaný prut [3] . . . . .	18
1.3	Stanovené průběhy tvarových funkcí . . . . .	19
1.4	Odečítání bodů pomocí WebPlotDigitizeru pro stanovení $R_k$ . . . . .	22
1.5	Průběh odvozených funkcí pro výpočet $R_k$ . . . . .	24
1.6	Model a okrajové podmínky osamělé piloty . . . . .	29
1.7	Zadání v programu SCIA . . . . .	30
1.8	Výstupy z programu SCIA . . . . .	30
1.9	Výpočet v našem MKP programu . . . . .	31
2.1	Výstup z našeho programu pro posouzení na 2.MS . . . . .	39
2.2	Výstup z programu Geo5 . . . . .	39
2.3	Vstupní parametry výpočtů . . . . .	40
2.4	Vnitřní síly v pilotě z programu Geo5 . . . . .	40
2.5	Horizontální deformace piloty z našeho programu . . . . .	41
2.6	Výsledný moment na pilotě z našeho programu . . . . .	41
2.7	Výsledný smyk na pilotě z našeho programu . . . . .	42
2.8	Posouzení na ohyb piloty z programu Geo5 . . . . .	43

## SEZNAM TABULEK

1.1	Regresní koeficienty pro jednotlivé typy hornin a zemin . . . . .	16
1.2	$E_{si}$ pro piloty v skalních a polo-skalních horninách . . . . .	16
1.3	$E_{si}$ pro piloty v nesoudržných zeminách . . . . .	17
1.4	$E_{si}$ pro piloty v soudržných zeminách . . . . .	17
2.1	Model zatížení A+B . . . . .	34
2.2	Počet a šířka zatěžovacích pruhů . . . . .	34
2.3	Hodnoty regulačních součinitelů $\alpha$ pro ČR . . . . .	35
2.4	Výsledné síly ze spojitého nosníku (mostovky) . . . . .	36
2.5	Výsledné síly z konzoly (pilíře) . . . . .	36
2.6	Vstupní parametry zemi . . . . .	38

## SEZNAM UKÁZEK KÓDU

1.1	Example of a listing. . . . .	23
1.2	Dělení piloty na elementy. . . . .	26
1.3	Implementace matice tuhosti prvku s kódovými čísly . . . . .	28
1.4	Numerické řešení výpočtu globálního vektoru zatížení . . . . .	28
1.5	Aplikace okrajové podmínky . . . . .	29

# ÚVOD

Prvotní myšlenkou pro vytvoření této práce byla snaha o pochopení metody konečných prvků a jejich aplikaci v geotechnice.

Mezi předměty statiky a následných předmětů, které přinesly znalosti Metody konečných prvků chybělo spojení, vysvětlující jednotlivé procesy na pozadí a jejich jemnosti.

S cílem objasnit, jakým způsobem jsou počítány jednoduché prvky MKP byl spočten matematický model a vytvořen malý MKP řešič. Dalším cílem bylo vytvořit funkční program, který je schopen za využití algoritmu MKP a aplikované metody výpočtu piloty dle 2. mezního stavu usnadnit práci budoucím uživatelům. Zároveň bude program připraven pro budoucí rozšíření na základě poznatků získaných při vytváření této práce.

Hlavní myšlenkou vytváření práce v dané formě byla snaha zkombinovat znalosti nabyté při studiu se znalostmi tvorby aplikací a vytvořit tak funkční program, použitelný v budoucí praxi.

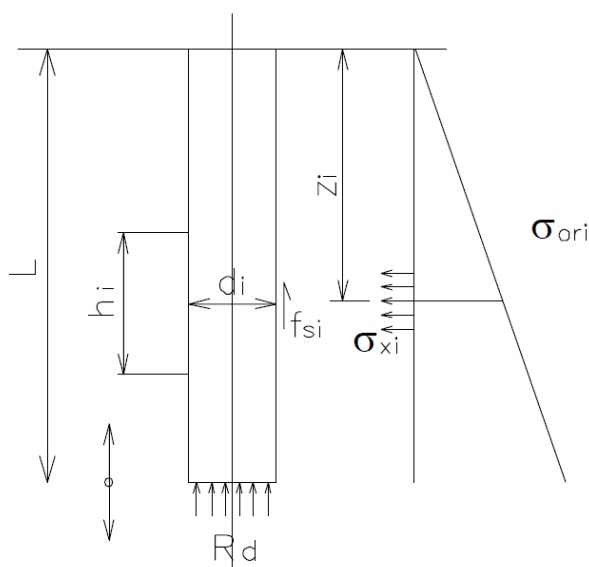
Výsledky práce budou v praktické části potvrzeny několika výpočty na reálném plánovaném objektu na obchvatu kolem Opavy.

Na závěr plánujeme zhodnotit nabyté znalosti, porovnat výsledky vůči komerčním programům a popsat možná zlepšení do budoucna.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

## 1.1 Teorie výpočtů pilot

### 1.1.1 Výpočet piloty dle EN 1997, 1.MS



Obr. 1.1: Statické schéma výpočtu únosnosti osamělé piloty dle 1.MS

Statické schéma výpočtu dle obr.1.1 Návrhová únosnost je dána vztahem:

$$U_{vd} = U_{bd} + U_{fd} \geq V_d \quad (1.1)$$

Vzorce a postup výpočtu neuvádíme, tento typ výpočtu prozatím není součástí námi vytvořeného programu. Čtenář si potřebná data a rovnice může dohledat v příručce pro navrhování základových konstrukcí.[1]

Při tomto výpočtu je třeba brát v potaz, že sčítáme maximální únosnost na plášti a patě, které ovšem nastávají při různých deformacích.

### 1.1.2 Výpočtová únosnost pilot hloubených do stlačitelného podloží dle Masopusta, 2.MS [2]

Popíšeme si pouze základní rovnice a postup výpočtu bez podrobných informací, které přebíráme z citovaného zdroje.

Rovnice plášťového tření je stanovena pro příslušný typ zeminy jako:

$$q_{si} = a - \frac{b}{D_i/d_i} \quad (1.2)$$

součinitele a,b můžeme najít v tabulce 1.1.

Poté výpočtová hodnota mezní síly na plášti je:

$$R_{su} = m_1 m_2 \pi \sum_{i=1}^n d_i l_i q_{si} \quad (1.3)$$

Pilota nese i na patě. Napětí na patě odpovídá:

$$q_p = e - \frac{f}{l/d_p} \quad (1.4)$$

součinitele e,f můžeme najít v tabulce 1.1.

Dále se stanoví průměrné plášťové tření jako vážený průměr hodnot  $q_{si}$ :

$$\overline{q_s} = \frac{\sum d_i l_i q_{si}}{\sum d_i l_i} \quad (1.5)$$

Dále můžeme stanovit koeficient přenosu zatížení do paty piloty:

$$\beta = \frac{q_p}{q_p + 4 \overline{q_s} l / d_p} \quad (1.6)$$

Zatížení na mezi plné mobilizace pláště se rovná:

$$R_y = \frac{R_{su}}{1 - \beta} \quad (1.7)$$

Odpovídající velikost sedání je dána:

$$s_y = l \frac{R_y}{d \overline{E_s}} \quad (1.8)$$

Příčinkový koeficient se spočte:

$$I = I_1 R_k \quad (1.9)$$

kde koeficienty odečítáme z grafu, do programu jsou zavedeny numericky dle kap.1.2.2.

Průměrný sečnový modul  $\overline{E_s}$  spočteme jako:

$$\overline{E_s} = \frac{\sum E_{si} l_i}{\sum l_i} \quad (1.10)$$

kde  $E_{si}$  odečteme interpolací z tabulek 1.2 až 1.4 dle daného typu zeminy(horniny).

Výsledné souřadnice  $(s_y, R_y)$  jednoznačně stanoví první větev zatěžovací křivky ve tvaru paraboly druhého stupně pro obor zatížení  $0 \leq R \leq R_y$ .

$$s = s_y \left( \frac{R}{R_y} \right)^2 \quad (1.11)$$

Druhá větev zatěžovací křivky je dána úsečkou s koncovým bodem o souřadnicích ( $s_2 = 25 \text{ mm}$ ,  $R_{bu}$ ):

$$R_{bu} = R_{su} + R_{pu} \quad (1.12)$$

kde

$$R_{pu} = \beta R_y \frac{s_{25}}{s_y} \quad (1.13)$$

Rovnice druhé větve je pak stanovena ve tvaru:

$$s = s_y + \frac{s_{25} - s_y}{R_{bu} - R_y} (R - R_y) \quad (1.14)$$

Výsledkem výpočtu je graf závislosti sedání a zatížení piloty až do mezní hodnoty  $s$  s možností odečítání sedání pro dané zatížení. Všechny zavedené rovnice a postup jsou zadány do programu numericky a všechny s tím spojené detaily jsou řešeny v kapitole 1.2

Tab. 1.1: Regresní koeficienty pro jednotlivé typy hornin a zemin

hornina		a	b	e	f
poloskalní	$R3$	246,02	225,95	2841,31	1298,96
	$R4$	169,98	139,45	1616,22	1155,34
	$R5$	131,92	94,96	957,61	703,89
nesoudržné	$I_d = 0,5$	62,46	16,06	268,11	174,89
	$I_d = 0,7$	91,22	48,44	490,34	445,42
	$I_d = 1$	154,03	115,88	1596,70	1399,88
soudržné	$I_c = 0,5$	46,39	20,81	197,74	150,22
	$I_c \geq 1, R6$	97,31	108,59	987,60	1084,26

Tab. 1.2:  $E_{si}$  pro piloty v skalních a polo-skalních horninách

$I_i(m)$	$d(m)$								
	0,6			1,0			1,5		
	$R3$	$R4$	$R5$	$R3$	$R4$	$R5$	$R3$	$R4$	$R5$
1,5	50,3	28,2	20,2	72,3	35,0	24,7	85,5	33,5	22,3
3	64,5	43,1	30,8	105,5	57,3	41,0	138,3	58,8	41,2
5	—	58,2	41,3	—	75,3	54,8	—	87,9	63,7
10	—	87,5	61,6	—	114,5	83,2	—	133,0	97,0



Tab. 1.3:  $E_{si}$  pro piloty v nesoudržných zeminách

$l_i(m)$	$d(m)$								
	0,6			1,0			1,5		
	$l_d$								
	0,5	0,7	1,0	0,5	0,7	1,0	0,5	0,7	1,0
1,5	11,0	13,7	28,3	12,8	15,8	30,6	13,0	15,3	29,0
3	15,5	20,2	44,5	18,4	25,0	47,8	19,4	24,5	52,5
5	18,8	26,6	56,1	22,8	32,5	69,1	24,5	36,0	78,2
10	23,8	36,6	72,1	29,8	47,8	93,4	32,6	54,0	107,3

Tab. 1.4:  $E_{si}$  pro piloty v soudržných zeminách

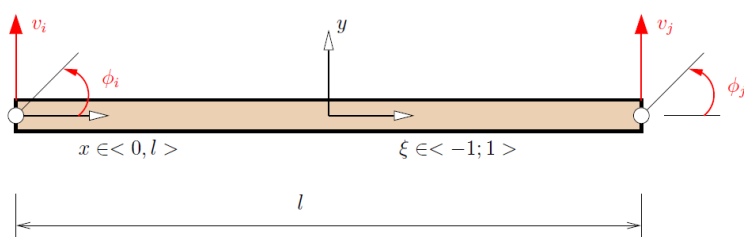
$l_i(m)$	$d(m)$					
	0,6		1,0		1,5	
	$l_c$					
	0,5	$\geq 1$	0,5	$\geq 1$	0,5	$\geq 1$
1,5	6,9	13,2	7,9	13,4	8,6	12,3
3	10,0	22,0	12,5	23,9	13,7	23,0
5	12,5	31,2	15,9	35,4	18,4	36,7
10	15,5	44,3	21,3	51,3	24,6	57,4

### 1.1.3 Prutová teorie MKP

#### Euler-Bernoulliho ohýbaný prut

Euler-Bernoulliho hypotéza hovoří o zachování kolmosti příčných řezů k deformované střednici prutu, proto lze vyjádřit posunutí ve směru osy  $x$  jako funkci vzdálenosti od normálové osy  $y$  a úhlu pootočení příčného řezu  $\phi$ .

Odvodíme si matici tuhosti ohýbaného prutu. Prut má dva uzlové body, v každém z nich má dvě deformační neznámé -  $v_{ij}$  a  $\phi_{ij}$  dle obr. 1.2.



Obr. 1.2: Model uzlových neznámých pro ohýbaný prut [3]

Stanovíme si báзовé funkce za pomoci přirozených souřadnic  $\xi = \frac{2x}{l} - 1$ . Přirozená souřadnice má hodnotu -1 pro  $x = 0$  a hodnotu 1 pro  $x = l$ . Průběh lze zapsat jako kubický polynom.

Bázové funkce hledáme tedy ve tvaru:

$$N_1(\xi) = a_1\xi^3 + a_2\xi^2 + a_3\xi + a_4 \quad (1.15)$$

kde neznámé koeficienty  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  a  $a_4$  nalezneme pomocí okrajových podmínek.

$$N_1(-1) = 1 \quad (1.16)$$

$$N_1'(-1) = 0 \quad (1.17)$$

$$N_1(+1) = 0 \quad (1.18)$$

$$N_1'(+1) = 0 \quad (1.19)$$

Derivace  $N_1$  podle  $\xi$  je rovna  $N_1'(\xi) = 3a_1\xi^2 + 2a_2\xi + a_3$ , řešíme soustavu rovnic:

$$-a_1 + a_2 - a_3 + a_4 = 1 \quad (1.20)$$

$$3a_1 - 2a_2 + a_3 = 0 \quad (1.21)$$

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 0 \quad (1.22)$$

$$3a_1 + 2a_2 + a_3 = 0 \quad (1.23)$$

dosazením do okrajových podmínek s  $\xi = -1$ . Výpočet lze zapsat maticově a výsledné neznámé zpětně dosadíme do tvarových funkcí. V případě pootočení uvažujeme okrajovou podmínku  $\phi_1 = \frac{l}{2}$ . Uvádíme zde kód programu Maxima pro řešení matematických úloh, výsledné tvarové funkce a grafy průběhů tvarových funkcí.

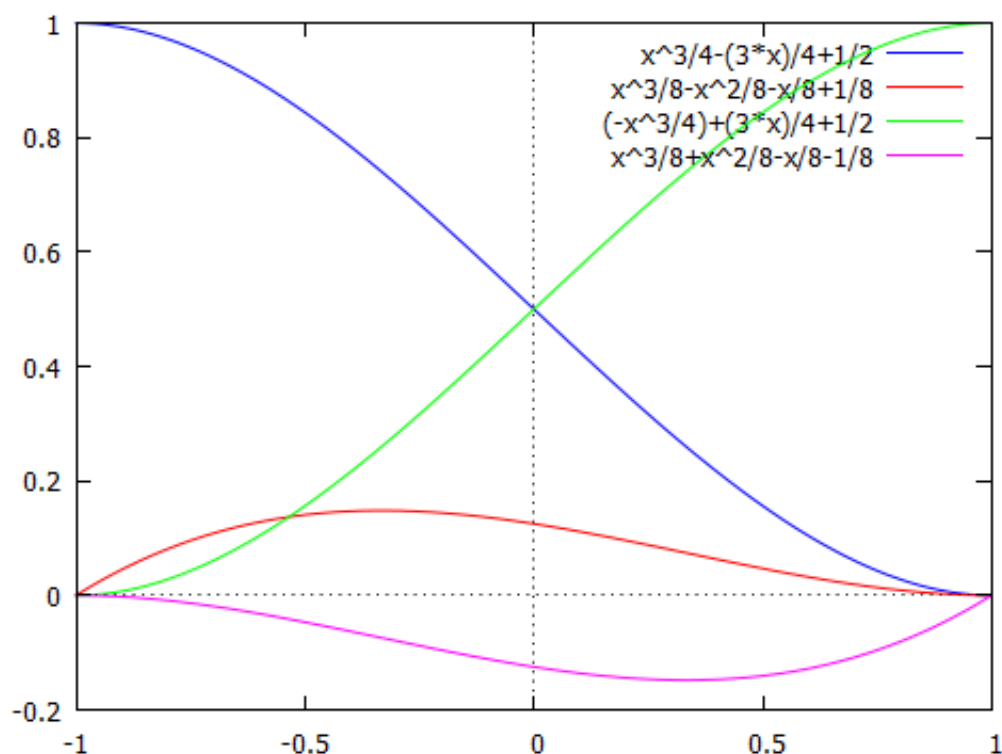
$$N_1(\xi) = \frac{\xi^3}{4} - \frac{3\xi}{4} + \frac{1}{2} \quad (1.24)$$

$$N_2(\xi) = \frac{\xi^3 l}{8} - \frac{\xi^2 l}{8} - \frac{\xi l}{8} + \frac{l}{8} \quad (1.25)$$

$$N_3(\xi) = -\frac{\xi^3}{4} + \frac{3\xi}{4} + \frac{1}{2} \quad (1.26)$$

$$N_4(\xi) = \frac{\xi^3 l}{8} + \frac{\xi^2 l}{8} - \frac{\xi l}{8} - \frac{l}{8} \quad (1.27)$$

Do tvarových funkcí dosadíme za  $\xi = \frac{2x}{l} - 1$ , provedeme derivace a doplníme do matic. Na obr.1.3 jsou zobrazeny všechny čtyři tvarové funkce pro ohýbaný prut.



Obr. 1.3: Stanovené průběhy tvarových funkcí

Vektor deformace:

$$\varepsilon(x) = -y\kappa = -y \frac{d^2 v}{dx^2} = -y N'' r = -y [B] \{r\}^{(e)} \quad (1.28)$$

Matice  $B$  bude složena z druhých derivací báзовých funkcí podle  $x$ :

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{6\xi}{l^2} & \frac{3\xi}{l} - \frac{1}{l} & -\frac{6\xi}{l^2} & \frac{3\xi}{l} + \frac{1}{l} \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

Matice tuhosti ohýbaného prutu lze odvodit z principu minima potenciální energie  $\lambda$ . Pro případ lineárně elastického materiálu je  $\lambda = \frac{1}{2}\sigma\varepsilon$ :

$$U = \int_V \lambda dV = \int_V \frac{1}{2} \sigma \varepsilon dV \quad (1.30)$$

Pokud uvažujeme lineární izotropní materiál, poté normálové napětí pro ohyb je rovno  $\sigma = \frac{M}{I}y$ , dále ze znalosti Hookeova zákona víme, že  $\sigma = E\varepsilon$ . Předpokládáme konstantní průřez po délce elementu, můžeme odvodit:

$$U = \int_V \frac{\sigma^2}{2E} dV = \int_0^l \frac{M^2(x)}{2EI^2} \int_A y^2 dA dx \quad (1.31)$$

Moment setrvačnosti k ose  $y$  průřezu je roven  $I_y = \int_A y^2 dA$ . Výsledný moment na elementu  $M(x) = EIv''$ .

$$\begin{aligned} U &= \int_0^l \frac{M^2(x)}{2EI} dx = \int_0^l \frac{E^2 I^2 (v'')^2}{2EI} dx = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left( \frac{d^2 v}{dx^2} \right)^2 dx = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l EI \kappa^2 dx \end{aligned} \quad (1.32)$$

Provedeme pár úvah o  $\kappa = Br$ . Za prvé,  $\kappa$  je skalár, lze psát  $\kappa = \kappa^T$ . Tudíž  $Br = r^T B^T$ . S touto znalostí můžeme vyčíslit  $\kappa^2$ :

$$\kappa^2 = (Br)^2 = BrBr = r^T B^T r^T B^T = r^T B^T Br \quad (1.33)$$

Nyní můžeme upravit výraz pro deformační energii ohýbaného prutu:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l EI r^T B^T Br dx \quad (1.34)$$

Celková potenciální energie  $\Pi$  je dána rozdílem deformační energie prutu a práce vnějších sil:

$$\begin{aligned} U &= \int_0^l \frac{M^2(x)}{2EI} dx = \int_0^l \frac{E^2 I^2 (v'')^2}{2EI} dx = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left( \frac{d^2 v}{dx^2} \right)^2 dx = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l EI \kappa^2 dx \end{aligned} \quad (1.35)$$

Nezapomenout při transformaci souřadnic na jakobián transformace, který je roven:

$$J = \frac{dx}{d\xi} \quad (1.36)$$

Pro náš případ  $x = \frac{l(\xi+1)}{2}$ , tudíž  $J = \frac{l}{2}$ .

Výsledná matice prvku ohýbaného prvku je:

$$K^{(e)} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ & \frac{4EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ & & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ & & & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (1.37)$$

Po dosazení vlivu normálových sil je výsledná matice prvku použita v programu rovna:

$$K^{(e)} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} + \frac{k_y l}{3} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} + \frac{k_y l}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} + \frac{156k_y l}{420} & \frac{6EI}{l^2} + \frac{22k_y l^2}{420} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} + \frac{54k_y l}{420} & \frac{6EI}{l^2} - \frac{13k_y l^2}{420} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} + \frac{22k_y l^2}{420} & \frac{4EI}{l} + \frac{4k_y l^3}{420} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} + \frac{13k_y l^2}{420} & \frac{2EI}{l} + \frac{3k_y l^3}{420} \\ -\frac{EA}{l} + \frac{k_y l}{3} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} + \frac{k_y l}{3} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} + \frac{54k_y l}{420} & -\frac{6EI}{l^2} + \frac{13k_y l^2}{420} & 0 & \frac{12EI}{l^3} + \frac{156k_y l}{420} & -\frac{6EI}{l^2} - \frac{22k_y l^2}{420} \\ 0 & \frac{6EI}{l^2} - \frac{13k_y l^2}{420} & \frac{2EI}{l} + \frac{3k_y l^3}{420} & 0 & -\frac{6EI}{l^2} - \frac{22k_y l^2}{420} & \frac{4EI}{l} + \frac{4k_y l^3}{420} \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

## 1.2 Program

### 1.2.1 Program pro odvození nedostupných vzorců z dat

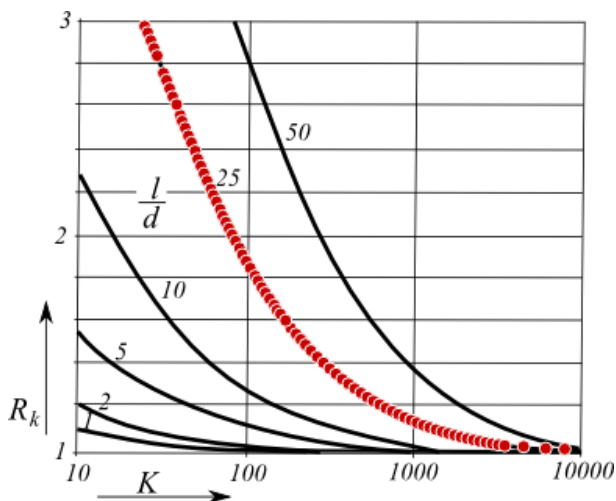
Vstup programu je definovaný v souboru *settings.ini*. Zde je potřeba zadat požadované parametry výpočtu. Výsledkem je graf vstupních hodnot proložených funkcí a textový soubor s navrženou funkcí. Tuto funkci budeme nadále používat ve výpočtovém modulu hlavního programu.

V programu je použita funkce *eval()*<sup>1</sup>. Tato funkce je potencionálně nebezpečná pro uživatele z důvodu možnosti spuštění škodlivého kódu<sup>2</sup>. Předpokládáme použití kódu autorem pro stanovení rovnic pro výpočty a program nebude šířen. Nebezpečí zanedbáváme.

### 1.2.2 Odvození vzorců pro numerický výpočet

Některé dodané grafy do výpočtu nemají k dispozici související matematické vyjádření, proto jsme vytvořili program využívající metodu polyfit z knihovny numpy. Tato metoda proloží daný soubor x-ových a y-ových souřadnic aproximovanou funkcí daného řádu.

Pro získání bodů využijeme internetový program WebPlotDigitizer<sup>3</sup>. Získané body proložíme křivkou a vyčíslíme si jednotlivé funkce pro dané výpočtové parametry.



Obr. 1.4: Odečítání bodů pomocí WebPlotDigitizeru pro stanovení  $R_k$

<sup>1</sup><https://docs.python.org/3/library/functions.html#eval>

<sup>2</sup><http://lybniz2.sourceforge.net/safeeval>

<sup>3</sup><http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/>

---

```

1  ...
2  try:
3      x_coords = [float(line.rstrip(delimiter)) for line in
4                  ↪ open(x_coords_file)]
5      y_coords = [float(line.rstrip(delimiter)) for line in
6                  ↪ open(y_coords_file)]
7  except FileNotFoundError as e:
8      handle_error(e)
9  results = open('Results.txt', 'w')
10 try:
11     popt, pcov = curve_fit(function2, x_coords, y_coords,
12                             ↪ p0=(1, 1, 1, 1))
13     results.write('{0}+ a ={1}; b ={2}; c ={3}; d
14                 ↪ ={4}'.format(str(polynomial_fit), str(popt[0]),
15                               ↪ str(popt[1]), str(popt[2]), str(popt[3])))
16     results.close()
17 ...
18
19
20 def function(x, a, b, c, d):
21     return d + (a - d) / (1 + (x / c) ** b)
22
23
24 def function2(x, a, b, c, d):
25     return (a * x + b) / (c * x + d)

```

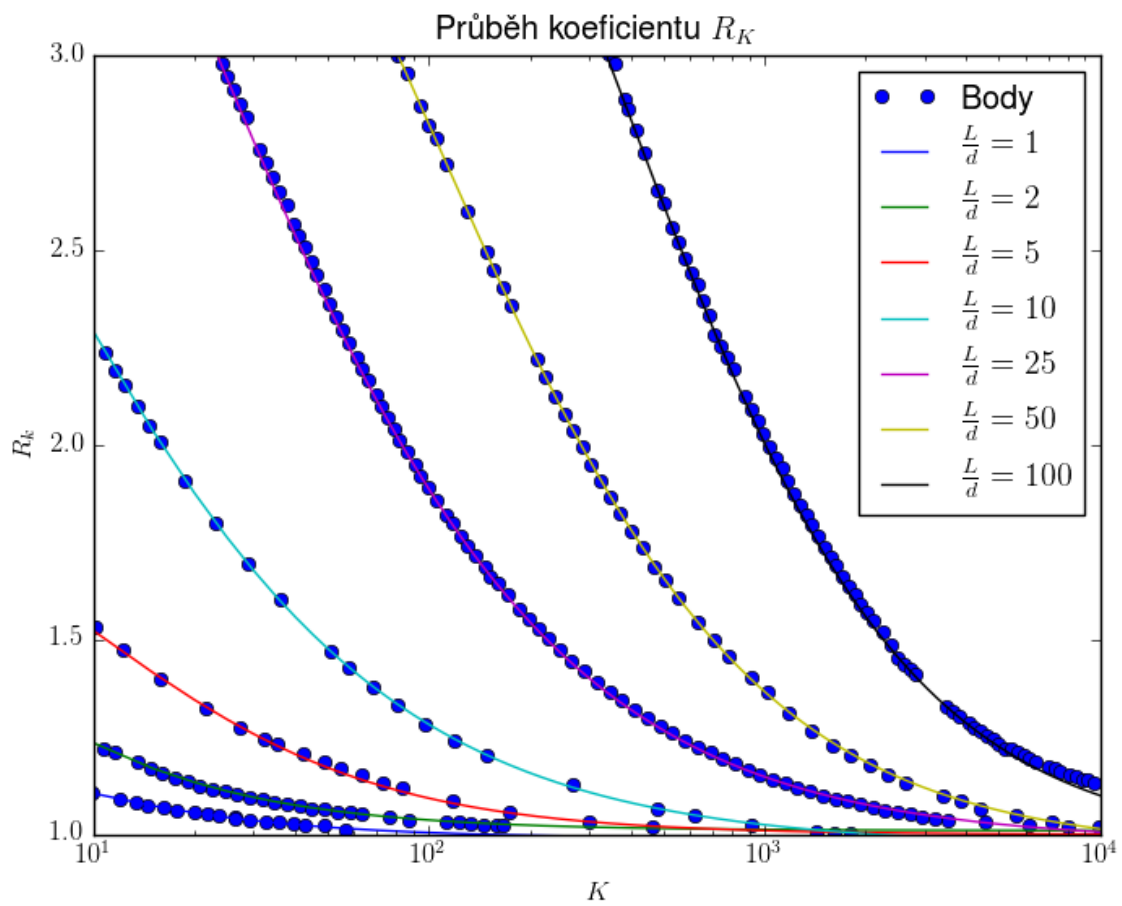
---

Ukázka kódu 1.1: Example of a listing.

Mezi těmito známými průběhy bude program interpolovat s násobkem vypočteného opravného součinitele, aby se přiblížil co nejpřesněji výsledku. Bereme v potaz nedohledatelnost původních vstupů do grafu a zároveň praktické využívání grafů prostým odečítáním z tištěných grafů se zohledněním velké nepřesnosti.

Výsledné funkce pro odečítání z grafu byly vypočteny následovně pro  $\frac{L}{d} = 1$ :

$$y = \frac{x + 4.75}{1.01x + 3.24} \quad (1.39)$$



Obr. 1.5: Průběh odvozených funkcí pro výpočet  $R_k$

pro  $\frac{L}{d} = 2$ :

$$y = \frac{x + 5.01}{0.99x + 2.25} \quad (1.40)$$

pro  $\frac{L}{d} = 5$ :

$$y = \frac{x + 19.72}{x + 9.51} \quad (1.41)$$

pro  $\frac{L}{d} = 10$ :

$$y = 0.97 - \frac{4.55 - 0.97}{1 + \left(\frac{x}{5.0613}\right)^{0.7866}} \quad (1.42)$$

pro  $\frac{L}{d} = 25$ :

$$y = 0.98 - \frac{5.4 - 0.98}{1 + \left(\frac{x}{18.9375}\right)^{0.8141}} \quad (1.43)$$

pro  $\frac{L}{d} = 50$ :

$$y = 0.96 - \frac{4.64 - 0.96}{1 + \left(\frac{x}{102.7411}\right)^{0.9159}} \quad (1.44)$$



pro  $\frac{L}{d} = 100$ :

$$y = 0.97 - \frac{4.85 - 0.97}{1 + \left(\frac{x}{370.7263}\right)^{1.0196}} \quad (1.45)$$

Chyba jednotlivých parametrů při prokládání funkcí vycházela pod 1%, považujeme proto výsledky za spolehlivé s ohledem na výše zmíněné praktické odečítání tzv. od oka. Body funkce grafu ve funkcích 1.39 až 1.41 prokládáme obyčejnou lomenou funkcí. Zbylé funkce proložíme čtyřparametrickou logistickou funkcí pro dosažení maximální přesnosti.

### 1.2.3 GUI - grafické rozhraní uživatele

Grafické rozhraní je psáno pomocí knihovny *PyQt5*[4]. Tato knihovna poskytuje relativně jednoduchou možnost tvorby rozhraní editorem, či dynamicky pomocí kódu. Budeme využívat obě možnosti. Zároveň lze výsledný program a jeho grafické rozhraní přenést do různých operačních systémů. Design programu pro potřeby diplomové práce dělíme na dvě části, v levém okně umístíme *widget* pro zobrazování výsledků, grafů etc. V pravé části je tzv. *tabWidget*, který nám umožňuje přepínat mezi různými okny. Zde vygenerujeme všechny potřebné uživatelské vstupy pro zvolenou metodu výpočtu.

Tyto vstupy jsou průběžně ukládány do SQL Lite databáze, odkud je lze snadno naparsovat pro potřeby výpočetního jádra programu. Přístup k tvorbě výpočetních částí programu je popsán v kapitole 1.2.4

### 1.2.4 MKP procesor

Pro výpočet vodorovně zatížených pilot jsme si naprogramovali program, založený na principu MKP. Díky jednoduchosti úlohy lze postup výpočtu MKP zjednodušit. Není potřeba využívat Gaussovu kvadraturu, volit integrační body a jiné. Přesnost výpočtu jsme ověřili modelováním v naprogramovaném jádře, zároveň s analytickými výpočty a na modelech v programu SCIA, považujeme tedy výpočet za použitelný v praxi.

Pro základní výpočty, uspořádání hodnot, navolení kódových čísel a seskupení matic využívá program knihovnu *Numpy*[5]. Původně využitou knihovnu pro vědecké výpočty *SciPy*<sup>4</sup> jsme dokázali odstranit, využitých pár funkcí jsme implementovali sami. Dále je programem využita knihovna pro grafickou prezentaci výsledků *Matplotlib*[6], která poskytuje úhledné, lehce editovatelné grafy pro výstupy výpočtů.

---

<sup>4</sup><https://www.scipy.org/>

V budoucí verzi plánujeme tuto knihovnu zbavit závislostí pro rychlejší procesování výstupů a zmenšení velikosti programu.

Na vstupu programu, v tzv. preprocesoru stojí naparsované seznamy vrstev zeminy s danými parametry, dále seznamy s vrstvami pilot různých materiálových, geometrických vlastností. Samotný program předpokládá po délce dílu konstantní průběh materiálových vlastností, aby bylo možné použít stanovené předpoklady podle teorie v kapitole 1.1.3. Tyto seznamy jsou dále děleny a řazeny pro zachování kontinuity zadání. Uvádíme příklad kódu 1.2 pro dělení piloty na elementy přibližné délky.

---

```
1 for i in range(0, len(L_glob)):
2     count = int(np.around(L_glob[i] / aprox_length))
3     for j in range(0, count):
4         L = np.append(L, L_glob[i] / count)
5
6 for i in range(0, len(L)):
7     elem = np.append(elem, i).astype(int)
```

---

Ukázka kódu 1.2: Dělení piloty na elementy.

---

```
1 for i in elem:
2     I = np.append(I,
3         [i * 3, i * 3, i * 3, i * 3, i * 3, i * 3, i * 3 +
4         ↪ 1, i * 3 + 1, i * 3 + 1, i * 3 + 1, i * 3 + 1, i * 3 + 1,
5         ↪ i * 3 + 1, i * 3 + 2, i * 3 + 2, i * 3 + 2, i * 3 + 2, i * 3 +
6         ↪ 2, i * 3 + 2, i * 3 + 2, i * 3 + 3, i * 3 + 3,
7         ↪ i * 3 + 3, i * 3 + 3, i * 3 + 3, i * 3 + 3, i * 3 + 3, i * 3 +
8         ↪ 4, i * 3 + 4, i * 3 + 4, i * 3 + 4, i * 3 + 4,
9         ↪ i * 3 + 4, i * 3 + 5, i * 3 + 5, i * 3 + 5, i * 3 + 5, i * 3 +
10        ↪ 5, i * 3 + 5, i * 3 + 5])
11
12     J = np.append(J,
13         [i * 3, i * 3 + 1, i * 3 + 2, i * 3 + 3, i * 3 + 4,
14         ↪ i * 3 + 5, i * 3, i * 3 + 1, i * 3 + 2, i * 3 +
15         ↪ 3,
16         ↪ i * 3 + 4, i * 3 + 5, i * 3, i * 3 + 1, i * 3 + 2,
17         ↪ i * 3 + 3, i * 3 + 4, i * 3 + 5, i * 3, i * 3 +
18         ↪ 1,
```

```

10         i * 3 + 2, i * 3 + 3, i * 3 + 4, i * 3 + 5, i * 3,
        ↪ i * 3 + 1, i * 3 + 2, i * 3 + 3, i * 3 + 4,
11         i * 3 + 5, i * 3, i * 3 + 1, i * 3 + 2, i * 3 + 3,
        ↪ i * 3 + 4, i * 3 + 5])
12     K = np.append(K,
13         [E * A / L[i] + kx * L[i] / 3, 0, 0, -E * A / L[i]
        ↪ + kx * L[i] / 6, 0, 0, 0,
14         12 * (E * I_y) / L[i] ** 3 + (156 / 420) * ky *
        ↪ L[i],
15         6 * (E * I_y) / L[i] ** 2 + (22 / 420) * ky * L[i]
        ↪ ** 2, 0,
16         -12 * (E * I_y) / L[i] ** 3 + (54 / 420) * ky *
        ↪ L[i],
17         6 * (E * I_y) / L[i] ** 2 - (13 / 420) * ky * L[i]
        ↪ ** 2, 0,
18         6 * (E * I_y) / L[i] ** 2 + (22 / 420) * ky * L[i]
        ↪ ** 2,
19         4 * (E * I_y) / L[i] + (4 / 420) * ky * L[i] ** 3,
        ↪ 0,
20         -6 * (E * I_y) / L[i] ** 2 + (13 / 420) * ky * L[i]
        ↪ ** 2,
21         2 * (E * I_y) / L[i] - (3 / 420) * ky * L[i] ** 3,
22         -E * A / L[i] + kx * L[i] / 6, 0, 0, E * A / L[i] +
        ↪ kx * L[i] / 3, 0, 0, 0,
23         -12 * (E * I_y) / L[i] ** 3 + (54 / 420) * ky *
        ↪ L[i],
24         -6 * (E * I_y) / L[i] ** 2 + (13 / 420) * ky * L[i]
        ↪ ** 2, 0,
25         12 * (E * I_y) / L[i] ** 3 + (156 / 420) * ky *
        ↪ L[i],
26         -6 * (E * I_y) / L[i] ** 2 - (22 / 420) * ky * L[i]
        ↪ ** 2, 0,
27         6 * (E * I_y) / L[i] ** 2 - (13 / 420) * ky * L[i]
        ↪ ** 2,
28         2 * (E * I_y) / L[i] - (3 / 420) * ky * L[i] ** 3,
        ↪ 0,

```

```

29         -6 * (E * I_y) / L[i] ** 2 - (22 / 420) * ky * L[i]
           ↪ ** 2,
30         4 * (E * I_y) / L[i] + (4 / 420) * ky * L[i] ** 3])
31
32 K_glob = coo_matrix((K, (I, J))).tolil()

```

---

Ukázka kódu 1.3: Implementace matice tuhosti prvku s kódovými čísly

---

```

1  for i in elem:
2      fij = np.append(fij, [i * 3, i * 3 + 1, i * 3 + 2, i * 3 +
           ↪ 3, i * 3 + 4, i * 3 + 5])
3      f = np.append(f, [0.5 * n0 * L[i], (1 / 2) * q * L[i], (1 /
           ↪ 12) * q * L[i] ** 2, 0.5 * n0 * L[i],
4      (1 / 2) * q * L[i], (-1 / 12) * q * L[i] ** 2])
5
6  f_glob = coo_matrix((f, (fij, fij))).tolil()

```

---

Ukázka kódu 1.4: Numerické řešení výpočtu globálního vektoru zatížení

Pro aplikaci okrajových podmínek vybíráme variantu, kde se nuluje daný řádek a sloupec, na diagonálu se poté dosadí 1 pro zachování matematické stability výpočtu. Varianta s redukcí matice nepřipadá na PC v úvahu z důvodu nutnosti přeskupit a přečíslit matice v paměti, což by za prvé mohlo vést k těžko odhalitelným chybám a za druhé by se znepřehlednil kód a výsledný výpočet by trval řádově déle.

Z důvodu aplikace modelu osamělé piloty uvažujeme pouhé tři varianty okrajových podmínek a to jsou následující:[7]

### 1. Vetknutá pilota

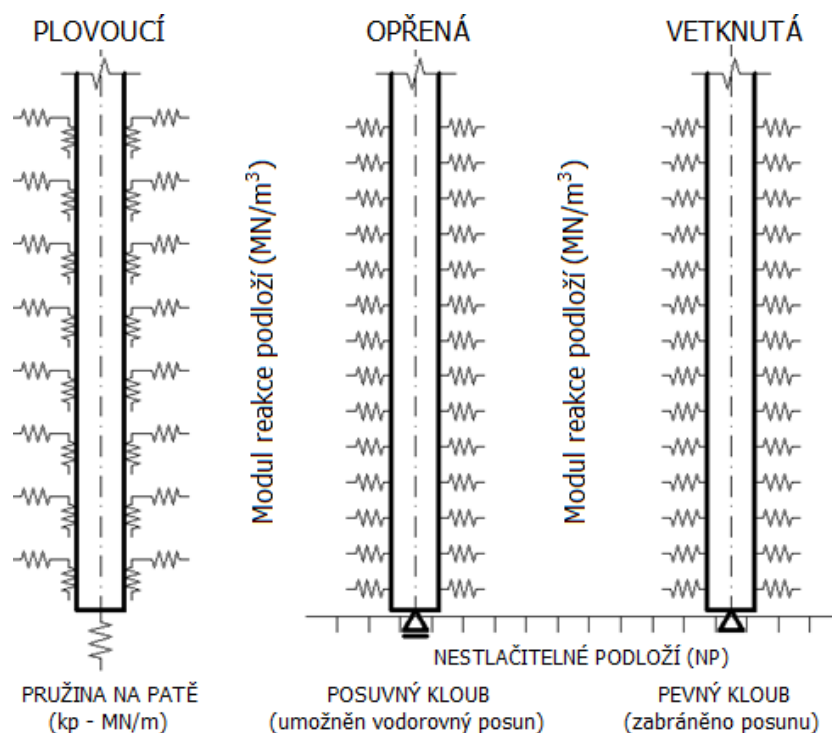
Pro tento případ uvažujeme v patě piloty okrajové podmínky podobné vetknuté konzole, tzn. pootočení i posunutí v obou směrech os je rovno nule. Zbytek piloty je podepřen horizontálními pružinami, svislé pružiny nejsou v rámci téměř nulové deformace piloty v osovém směru. nutné.

### 2. Opřená pilota

Podobně jako u vetknuté piloty neuvažujeme svislé pružiny, v patě piloty není okrajovou podmínkou zamezeno pootočení a posunu v horizontálním směru.

### 3. Plovoucí pilota

Plovoucí pilota je řešena čistě podepřením pružinami, které simulují odpor zeminy v tlaku, smyk na plášti a únosnost v patě piloty viz obr. 1.6. [7]



Obr. 1.6: Model a okrajové podmínky osamělé piloty

---

```

1 K_glob[:, end_boundary] = 0
2 K_glob[end_boundary, :] = 0
3 K_glob[end_boundary, end_boundary] = 1

```

---

Ukázka kódu 1.5: Aplikace okrajové podmínky

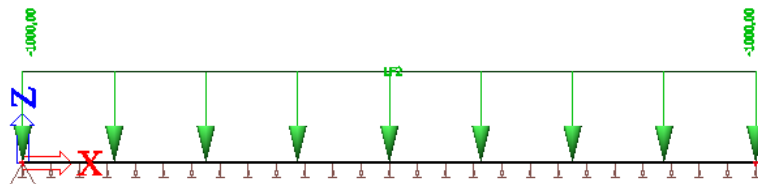
Osamělé síly v uzlech jsou zavedeny do programu čistě přičtením k danému uzlu a stupni volnosti. Díky zavedení našich předpokladů pro model MKP uvažujeme oddělené působení uzlových sil, tzn. osově síly vyvodí normálové síly, kolmá zatížení na prvky vyvodí smyk a momentová zatížení vyvodí momenty.

Program sám v místě osamělých břemen a momentů vytvoří uzel a prvky jsou poté využívány pouze pro výpočet působení spojitých zatížení.

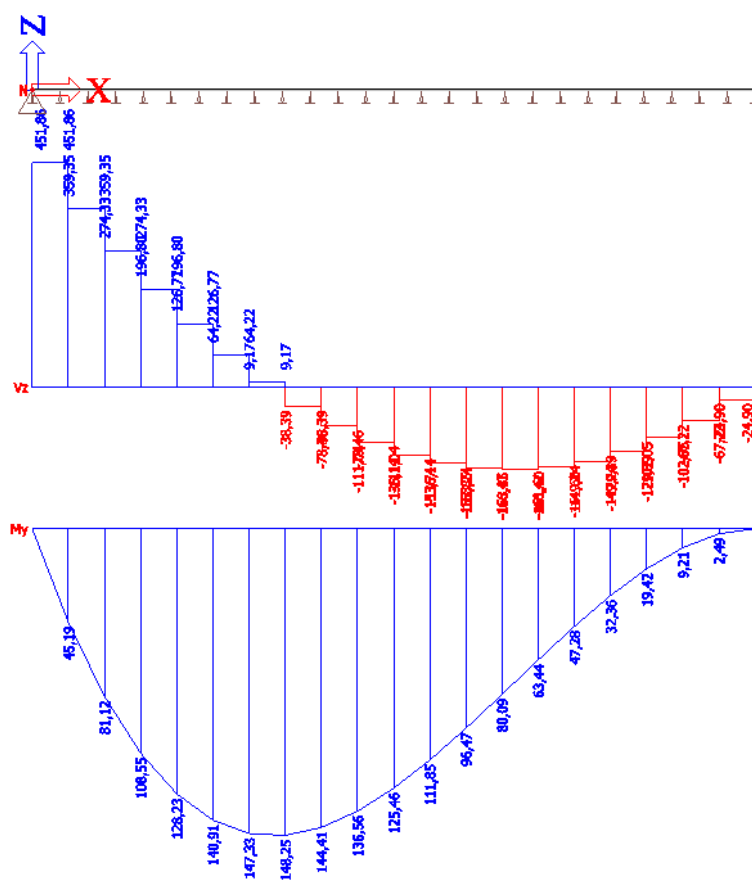
### Ověření finální matice tuhosti výpočtem v komerčním software SCIA Engineering

Pro ověření správného určení matice tuhosti elementu a celkového postupu a výpočtu MKP si určíme pár příkladů, které ověříme několika možnými způsoby. V prvním zadání jde o nosník délky 2 metry, který je v počátku kloubově podepřen. Uložen

je na pružném podloží, které je simulováno pružinami o vertikální tuhosti 1MN/m. Pro obě zadání uvažujeme shodnou geometrii a celý prut zatížíme lineárním zatížením o hodnotě 1MN/m.

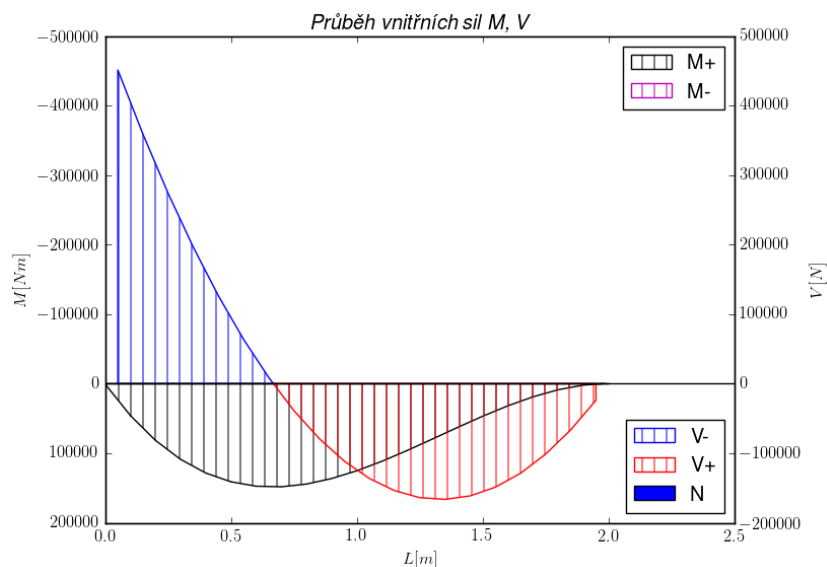


Obr. 1.7: Zadání v programu SCIA



Obr. 1.8: Výstupy z programu SCIA

U obou případů lze sledovat téměř shodné výsledky, rozdíly jsou dány post-processingem výstupů, kde jsme navrhli lineární interpolaci a dopočítávání hodnot na elementech, zatímco ve SCIA se zdají být výsledky pouze dopočteny z deformací,



Obr. 1.9: Výpočet v našem MKP programu

tzn. momenty jsou lineární po elementu a posouvající síly, případně normálové jsou po délce prvku konstantní.

### Chyby vznikající z formulace MKP a z výpočtu skrze software

Při použití MKP je potřeba brát v potaz následující zdroje možných chyb a zohlednit je v návrhu modelu:<sup>5</sup>

1. **Zjednodušená geometrie** - dělíme určitý prostor na konečný počet prvků daného tvaru, tzn. použití lineárních prvků u oblouků může způsobit nepřesnosti při aproximaci prostoru.
2. **Polynomy** - průběh sil na elementech je předpokládán polynomický daných řádů, což nemusí ani zdaleka odpovídat realitě.
3. **Numerická integrace** - pro výpočet integrálů bývá využívána např. Gaussova kvadratura, která zjednodušuje a zkresluje výsledné výstupy jako výpočet plochy:

$$A = \int_{-1}^1 f(x)dx \approx f\left(-\frac{1}{\sqrt{3}}\right) + f\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \quad (1.46)$$

4. **Konečný počet číslic** - počítač dovede uchovat pouze konečný počet platných číslic, poté zaokrouhluje. Dále je třeba si uvědomit, že výpočet probíhá v dvojkové soustavě a zde mohou vznikat další chyby z důvodu zaokrouhlení při převodu z desítkové soustavy. Pro další podrobnosti a různé příklady chyb doporučujeme nahlédnout do prezentace

<sup>5</sup><[http://web.mit.edu/16.810/www/16.810\\_L4\\_CAE.pdf](http://web.mit.edu/16.810/www/16.810_L4_CAE.pdf)>

na adrese <[http://www.math.pitt.edu/~trenchea/math1070/MATH1070\\_2\\_Error\\_and\\_Computer\\_Arithmetic.pdf](http://www.math.pitt.edu/~trenchea/math1070/MATH1070_2_Error_and_Computer_Arithmetic.pdf)>.

5. **Rozdíly v tuhosti elementů** - tyto rozdíly mohou vést při vyhodnocování soustavy rovnic až k dělení nulou.
6. **Špatná volba typu elementu** - např. použití skořepinových prvků v místě, kde je potřeba uvažovat deskové.
7. **Nedostatečné okrajové podmínky** - dojde ke vzniku mechanismu.
8. **Nekonzistentní jednotky** - např. použití tuhosti v GPa a síly v librách.<sup>6</sup>

A na závěr je potřeba vzít v potaz následující rčení, že každá metoda MKP a každý model dovede vytvořit krásné, barevné obrázky, otázkou zůstává, nakolik jsou věrné realitě a jak jsou použitelné v praxi.

## 1.3 Výsledná kompilace programu

Program byl vytvořen ve vývojovém prostředí Anaconda pro Python3, pro možnost spuštění programu uživatelem bylo potřeba zkompilevat kód a převést do srozumitelné formy, v našem případě archiv, obsahující spustitelný soubor.

Výsledný program byl zkompileván do spustitelné verze pro operační systém Windows. Aktuální verze je ke stažení na adrese <<https://goo.gl/danveR>>. Soubor byl také přiložen jako součást přiloženého archivu k práci. Program je spustitelný po rozbalení archivu přes executable soubor main.exe.

---

<sup>6</sup><[http://www.math.pitt.edu/~trenchea/math1070/MATH1070\\_2\\_Error\\_and\\_Computer\\_Arithmetic.pdf](http://www.math.pitt.edu/~trenchea/math1070/MATH1070_2_Error_and_Computer_Arithmetic.pdf)>



## 2 PRAKTICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE

### 2.1 Situace

Pro ukázkou výpočtu jsme vybrali projekt **Silnice I/11 Opava, severní obchvat – západní část**. Zvolený objekt **SO 206 Most na silnici I/11 přes III/01129 a polní cestu** se nachází na plánovaném km 4,80km trasy. Poskytnuta nám byla dokumentace pro územní řízení (DUR). Z důvodu neúplných podkladů, které budou muset být pro skutečný návrh a realizaci zpřesněny dodatečnými statickými výpočty, odběrem vzorků a laboratorními zkouškami bude ukázkový výpočet proveden za pomoci podkladů z předmětu Betonové mosty 2.

### 2.2 Geologické poměry a IGP

Pro stavbu byl proveden předběžný inženýrsko-geologický průzkum ( G-Consult, spol. s r.o., listopad 2012 - leden 2013).

U mostu přes trať lze předpokládat vliv podzemní vody na zakládání, protože se hladina podzemní vody nachází nad úrovní nosné základové půdy. Naražená hladina je 1,6m, ustálená 1,5m pod terénem.

Podle závěru průzkumu spadá most do 2. geotechnické kategorie dle ČSN EN 1997-1. Průzkum doporučuje založit most hlubinně na pilotových základech. Je doporučeno piloty vetknout do prostředí marinních jíľů, jejichž strop se nachází na úrovni cca 251,1-254,7 m n.m. Při hloubení piloty je doporučeno průběžné pažení a použití bentonitového výplachu pro zajištění stability stvolu vrtané piloty.

Oblast založení mostu byla zkoumána vrtem JV-164 a dynamickou penetrací DP-163 a DP-165. V prostoru mostu jsou po skřívce mostu tyto geologické poměry:

1. GT 1f fluvialní jíľy: povrch vrstvy 0,3-0,5 m p.t., báze vrstvy 0,9-2,3
2. GT 2g glacialní písky: povrch vrstvy 0,9-2,3 m p.t., báze vrstvy 1,2-7,9
3. GT 3fu fluvialní šterky: povrch vrstvy 1,2-7,9 m p.t., báze vrstvy 3,6-8,6
4. GT 4m marinní jíľy: povrch vrstvy 3,6-8,6 m p.t., báze vrstvy nezastižena

Pro další stupeň projektové dokumentace je nutné provést podrobný inženýrskogeologický průzkum a korozní průzkum.

## 2.3 Zatížení a statický model horní stavby

### 2.3.1 Zatížení

#### Návrh zatížení

1. **Stálé zatížení** počítáme dle přibližného předpokladu tvaru mostní konstrukce, mostovky a návrhem zatížení osazením mostního zařízení dle tab.
2. **Nahodilé zatížení** rozdělíme do tří skupin. Pohyblivé zatížení TS ve spojení s plošným zatížením UDL v skupině A+B a výsledně dopočteme zatížení brzd-  
nými a rozjezdovými silami jako

$$\max \left\{ \frac{5\%}{15\%} \right\} \}_{extrem}^{plne} \leq 300 kN \quad (2.1)$$

Kategorie komunikace spadá do skupiny pozemních komunikací I. Zatížení ode-  
čítáme dle tabulky 2.1 a upravujeme součinitele z tab. 2.3

Šířka zatěžovacích pruhů se vypočte pro komunikaci  $w > 6m$  dle tab. 2.2

Roznos do nosné kce zanedbáváme, jelikož nenavrhujeme mostní konstrukci.  
Zatížení vyjímecné dle normy nezapočítáme.

Tab. 2.1: Model zatížení A+B

Umístění	Dvojnáprava (TS)	Rovnoměrné zatížení (UDL)
	nápravové síly $Q_k$ [kN]	$q_{ik}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Pruh č. 1	300	9
Pruh č. 2	200	2,5
Pruh č. 3	100	2,5
Ostatní pruhy	0	2,5
Zbývající plocha	0	2,5

Tab. 2.2: Počet a šířka zatěžovacích pruhů

Šířka vozovky $w$ [m]	Počet zatěžovacích pruhů $n_i$	Šířka zatěžovacího pruhu $w_i$ [m]	Šířka zbývající plochy [m]
$w < 5,4m$	1	3	$w - 3$
$5,4m < w \leq 6m$	2	$w/2$	0
$6m \leq w$	$int(w/3)$	3	$w - 3 \times n$

Tab. 2.3: Hodnoty regulačních součinitelů  $\alpha$  pro ČR

Skupina pozemních komunikací	$\alpha_{Q1}$	$\alpha_{Q2}$	$\alpha_{Q3}$	$\alpha_{q1}$	$\alpha_{q2}$	$\alpha_{qi}(i > 2)$ $\alpha_{qr}$
I	1	1	1	1	2,4	1,2
II	0,8	0,8	0,8	0,45*	1,6	1,6

### Výpočet zatížení

Výsledná šířka pojezdové plochy je  $w = 11,5\text{ m}$ . Z toho vypočtený počet pruhů  $n_l = 3$  a zbylý pruh šířky 2,5m.

Zatížení vrchní mostní stavby je následující:

1. **spojité stále** = vlastní tíha + vybavení dle rce. 2.2.

$$g_0 = A_0 \gamma_c + 2G_1 = 9,82 \cdot 25 + 2 \cdot 1,5 = \mathbf{248,5 \text{ kN/m'}}$$
 (2.2)

2. **spojité nahodilé UDL** dle rce. 2.3.

$$\begin{aligned}
 q_{UDL} &= \sum_{i=1}^3 w_i s \alpha_{qi} q_{ik} + w_r \alpha_{qr} q_{rk} = \\
 &= 3 \cdot 9 \cdot 1 + 3 \cdot 2,4 \cdot 2,5 + 3 \cdot 1,2 \cdot 2,5 + 2,5 \cdot 1,2 \cdot 2,5 = \\
 &= \mathbf{61,5 \text{ kN/m'}}
 \end{aligned}$$
 (2.3)

3. **pohyblivá dvojice sil TS**

Pro rozpětí větší jak 10 m lze nahradit dvojici sil jednou silou rovnou součtu sil na dvojnápravu. Výsledná síla působící na náhradní spojitý nosník dle rovnice 2.4

$$Q_{TS} = \sum_{i=1}^3 2\alpha_{Qi} Q_i = 2 \cdot 1 \cdot 300 + 2 \cdot 1 \cdot 200 + 2 \cdot 1 \cdot 100 = \mathbf{1200 \text{ kN}} \quad (2.4)$$

### 2.3.2 Statický model

Statický model volíme s ohledem na výsledný síly v patách pilířů pro návrh základové konstrukce. Pro zjednodušení výpočtu zanedbáváme dynamickou stránku zatížení a vliv odstředivé síly z důvodu umístění mostu ve velice mírném oblouku ( $R=10\text{ km}$ )

Model mostovky uvažujeme jako spojitý nosník zatížený silami z kapitoly 2.3.1. Za pomoci SCIA software dopočítáme příčinkové čary a vliv pohyblivé soupravy. Hledáme kombinaci pro maximální osově zatížení pilíře. Vrchní stavba bude na pilíři uložena kloubově přes dodatečně navržená ložiska. Započteme vliv imperfekcí a vzpěru

do výsledného zatížení základu pilířem. Výpočet zatížení spojitého nosníku je uveden v příloze C.1 a následný výpočet konzoly v příloze C.2.

Výslednými silami dle tab. 2.4 zatížíme model pilíře, uvažovaný jako vetknutou konzolu.

Tab. 2.4: Výsledné síly ze spojitého nosníku (mostovky)

	Hodnota [kN]
$M_{Ed}$	0
$R_z$	10727,74
$R_x$	0

Dodatečný moment působící v místě ložiska dopočteme za pomoci excentricity z geometrických imperfekcí dle vztahů 2.5 a 2.6.

$$e_i = l_i/400 = 11840/400 = \mathbf{29,6 \text{ mm}} \quad (2.5)$$

$$M_{0Ed} = N_{Ed} \cdot \left( \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} + \frac{e_i}{1000} \right) = 10727,74 \cdot \left( \frac{0}{10727,74} + \frac{29,6}{1000} \right) = \mathbf{317,54 \text{ kNm}} \quad (2.6)$$

Na výsledné síly dle tabulky 2.5 navrhujeme naše zvolené založení, mostovka je uložena na dvojici pilířů, symetrických, proto uvažujeme výsledné síly poloviční.

Tab. 2.5: Výsledné síly z konzoly (pilíře)

	Hodnota [kN]
$M_{Ed}$	1934,77
$R_z$	5748,04
$R_x$	150

## 2.4 Návrh a posouzení založení

### 2.4.1 Návrh rozměrů

Navržena bude základová patka minimálně 1m vysoká nad základovou sparou v hloubce 1,5m pod původním terénem na únosné základové půdě. Čtvercová, centricky umístěna pod pilířem, maximálního rozměru 6,8m na 6,8m v případě spojení založení obou pilířů v jeden statický celek pro sjednocení sedání ve směru příčného řezu mostem. Symetricky zatíženou skupinu posuzovat jako součet únosnosti jednotlivých pilot, jinak řečeno posoudíme jednotlivou pilotu na částečné zatížení.[2]

V našem případě svislou a vodorovnou sílu rozdělíme na čtyři části, momentové zatížení zachováme pro každou pilotu na maximální hodnotě, jelikož v závislosti na poloze pohyblivého zatížení může být jednotlivé piloty ve skupině zatěžovány momenty v obou směrech.

Skupina čtveřice symetricky umístěných pilot kolem tížného centra pilíře, v osové vzdálenosti 3,4m o průměru 1m. Hloubku založení pilot volíme na úrovni nosné půdy v hloubce -1,5m pod terénem na úrovni ustálené hladiny podzemní vody. Ve výpočtu zanedbáme vliv odtížení základové spáry na stranu bezpečnou.

### 2.4.2 Vstupní parametry zemin

V oblasti založení mostního pilíře byl proveden jeden průzkumný vrt, z něhož byly odebrány pouze dva vzorky v rámci předběžného průzkumu. Z tohoto důvodu volíme parametry zemin na základě několika laboratorních výstupů a pohledových popisů kvality a stavu zemin z jádra vrtu dle tabulkových hodnot zrušené normy ČSN 73 1001. Parametry volíme s ohledem na stav zeminy a hloubku odběru, spíše v rámci středních hodnot daných parametrů v tabulkách 11, 12 a 13 jmenované normy.

### 2.4.3 Výpočet únosnosti piloty

#### 2.4.4 Výpočet vertikální únosnosti dle 2.MS

Modul pevnosti betonu C30/37 Edef uvažujeme jako 66% z vstupního modulu 32 GPa z důvodu betonování do zeminy. Při vytahování pažnice, postupném betonování může dojít k znehodnocení betonové směsi zeminou i přes bentonitové pažení. Uvažujeme tedy přibližně  $E_c = 21\,000\text{ MPa}$ .

Po zadání všech parametrů dle naší vstupní tabulky č. 2.6 ve spojení s tabulkami z kapitoly 1.1.2 do našeho připraveného programu je výstupem obr. 2.1 a výsledné hodnoty sedání 12,47mm.

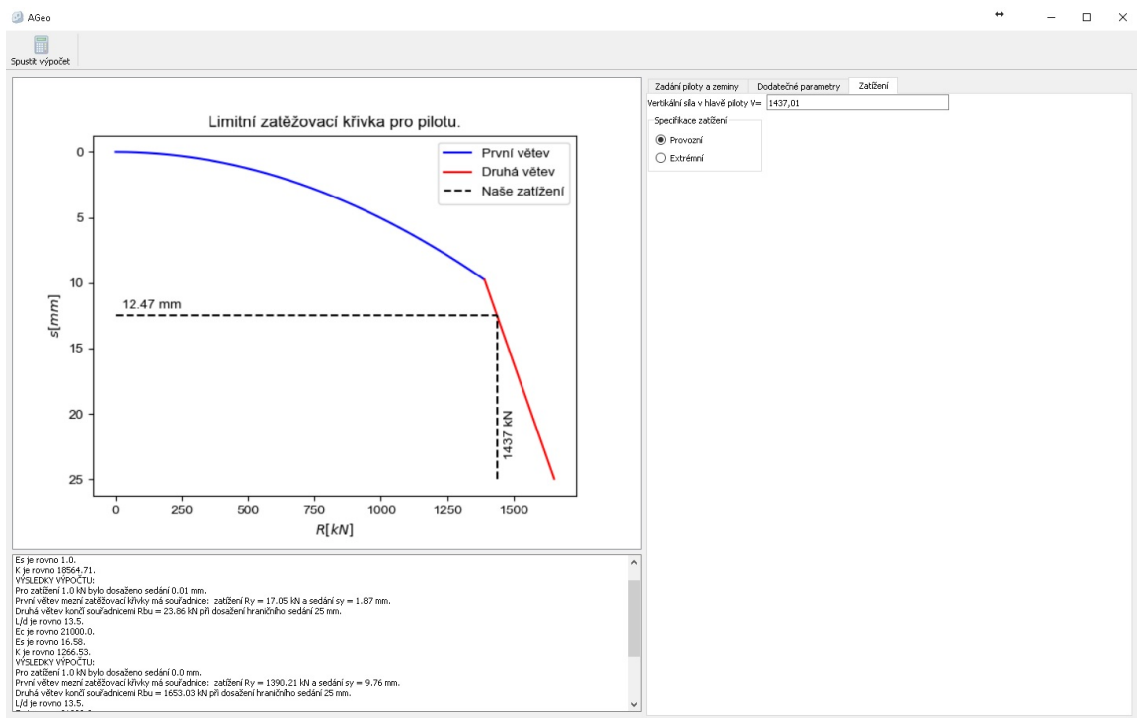
Tab. 2.6: Vstupní parametry zemi

$h[m]$	ČSN EN ISO 14688-2	ČSN 73 6133	$I_d$	$I_c$	$\nu$	$\beta$	$E_{def}$ [MPa]	$\phi_{ef}$	$c_{ef}$	$\gamma$
0,2	saSi	F4 CS	-	<0,5	0,35	0,62	3	24	14	18
0,6	siclSa	S5 SC	0,35 - 0,65	-	0,35	0,62	8	27	8	18,5
0,1	clSi	F6 CL	-	<0,5	0,40	0,47	2	12	19	21
0,4	saSi	F4 CS	-	<0,5	0,35	0,62	3	24	14	18
0,8	siclSa	S5 SC	0,35 - 0,65	-	0,35	0,62	8	27	8	18,5
0,8	saCl	F4 CS	-	<0,5	0,35	0,62	3	24	14	18
0,4	siSa	S3 S-F	0,35 - 0,65	-	0,30	0,74	15	29	0	17,5
0,2	saGr	G3 G-F	0,35 - 0,65	-	0,25	0,83	85	32	0	19
0,2	siSa	S3 S-F	0,35 - 0,65	-	0,30	0,74	15	29	0	17,5
0,5	saGr	G3 G-F	0,35 - 0,65	-	0,25	0,83	85	32	0	19
0,3	siSa	S5 SC	0,35 - 0,65	-	0,35	0,62	8	27	8	18,5
0,2	siCl	F6 CL	-	<0,5	0,40	0,47	2	12	19	21
0,4	siSa	S3 S-F	0,35 - 0,65	-	0,30	0,74	15	29	0	17,5
0,2	sisaCl	F4 CS	-	<0,5	0,35	0,62	3	24	14	18
0,3	siclGr	G5 GC	0,35 - 0,65	-	0,30	0,74	50	30	6	19,5
0,8	siSa	S5 SC	0,35 - 0,65	-	0,35	0,62	12	26	10	18,5
7,1	cl	F8	-	0,88	-	-	10	23,4	19,3	19,4

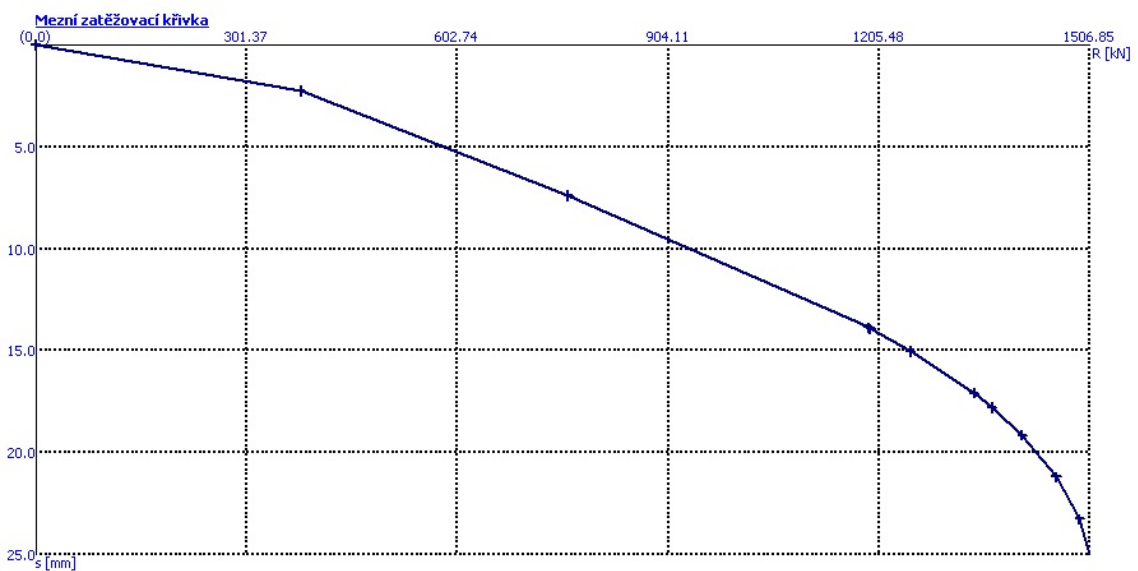
Připravili jsme si analytický výpočet za pomoci MS Excel, do kterého jsme dosadili shodné parametry a provedli odečet hodnot z tištěných grafů odhadem. Výsledné hodnoty jsou shodné s našimi výstupy. Největší rozdíly se prokázaly při odečítání hodnot z grafů, které vedly k rozdílům ve vypočteném sedání  $\pm 1mm$ .

### 2.4.5 Horizontální únosnost pilot

Pro ověření výpočtu horizontálně zatížené piloty jsme pro náš program a pro zadání v Geo5 uvažovali shodné hodnoty dle tabulky 2.6. Tyto hodnoty byly doplněny na základě parametrů z tabulek základových půd v ČSN 73 1001 pro úplnost výpočtu a možnost porovnání výstupů. Výsledné vstupní parametry lze vidět na obrázku č. 2.3. Výstupy lze porovnat dle obrázků 2.4 až 2.7.



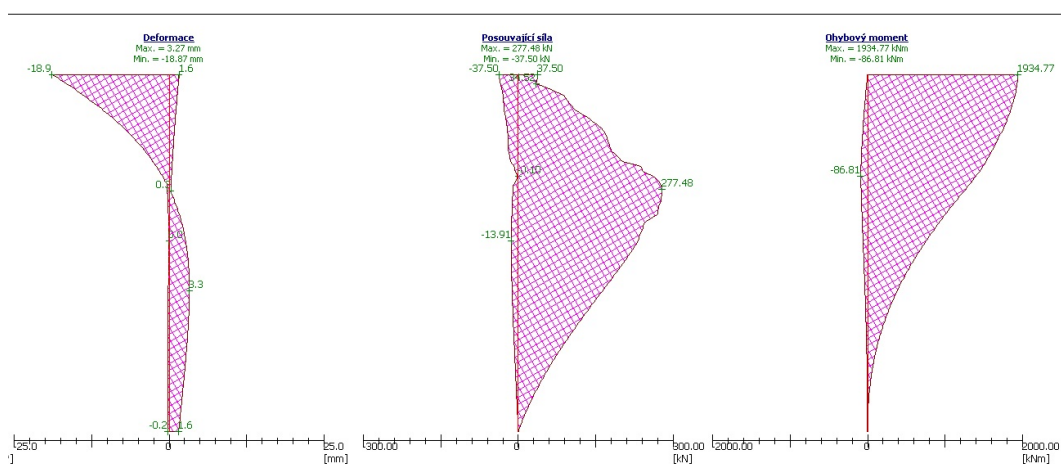
Obr. 2.1: Výstup z našeho programu pro posouzení na 2.MS



Obr. 2.2: Výstup z programu Geo5

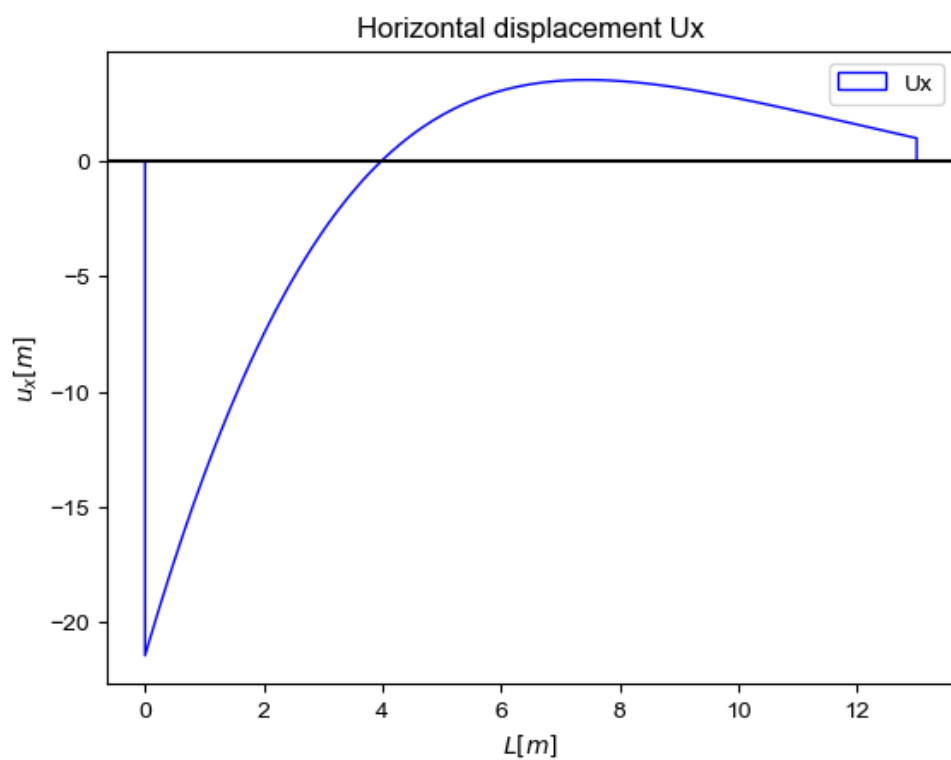
Parametry zeminy Parametry piloty Tuhost Zatížení Parametry výpočtu							
Pokud není v parametrech piloty vybrána možnost plovoucí piloty, lze nechat hodnoty vislé pružin $K_y$ nulové							
+ Přidat vrstvu				- Odebrat vrstvu			
	Název vrty	Mocnost vrstvy [m]	$E_{def}$ vrstvy [Pa]	$c$ [Pa]	$\phi$ [°]	$K_y$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\beta$ [°]
1	F4	0,2	3,25	14	24,5	0	12,25
2	S5	0,6	8	8	27	0	13,5
3	F6	0,1	2,25	12	19	0	9,5
4	F4	0,4	3,25	14	24,5	0	12,25
5	S5	0,8	8	8	27	0	13,5
6	F4	0,8	3,25	14	24,5	0	12,25
7	S3	0,4	15,5	0	29,5	0	14,75
8	G3	0,2	85	0	32,5	0	16,24
9	S3	0,2	15,5	0	29,5	0	14,75
10	G3	0,5	85	0	32,5	0	14,75
11	S5	0,3	8	8	27	0	13,5
12	F6	0,2	2,25	12	19	0	9,5
13	S3	0,4	15,5	0	29,5	0	14,75
14	F4	0,2	3,25	14	24,5	0	12,25
15	G5	0,3	50	6	30	0	15
16	S5	0,8	8	8	27	0	13,5
17	F8	7,1	10	5	15	1	7,5

Obr. 2.3: Vstupní parametry výpočtů

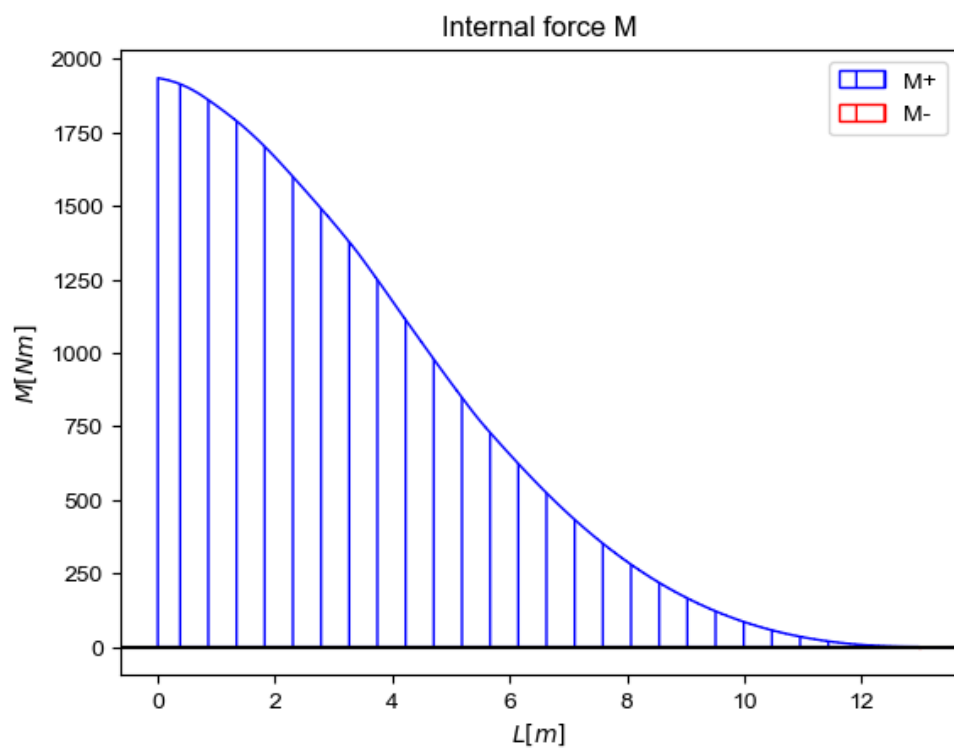


Obr. 2.4: Vnitřní síly v pilotě z programu Geo5

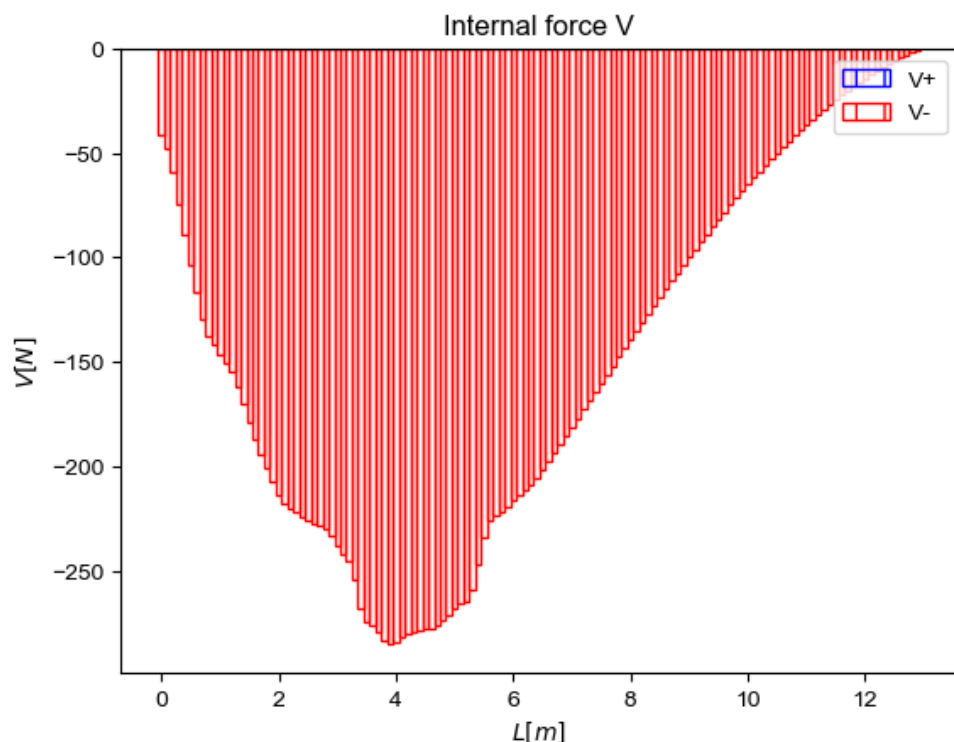




Obr. 2.5: Horizontální deformace piloty z našeho programu



Obr. 2.6: Výsledný moment na pilotě z našeho programu



Obr. 2.7: Výsledný smyk na pilotě z našeho programu

## 2.4.6 Zhodnocení výstupů

Na základě všech výsledků jsme navrhli pilotu o průměru 1m, vrtanou a vetknutou -15m pod nynějším terénem do jílu. Pilota by měla být vyztužena armovacím košem z minimálně 14 profilů 30mm a ovinuta smykovou výztuží profilu 10mm po maximální vzdálenosti ovinu 200mm pro dosažení minimálních kritérií pro vyztužení a splnění ohybové únosnosti piloty dle obr. 2.8.

Je potřeba brát v potaz, že vstup byl zjednodušen se záměrem ověřit výpočetní schopnosti námi navrženého programu. Pro skutečný návrh v praxi je potřeba stávající průzkum doplnit dodatečným průzkumem, odběrem vzorků a laboratorními zkouškami. Je také potřeba úzké spolupráce se statikem navrhujícím mostní konstrukce na stavbě pro dosažení optimálních parametrů co se týče zatížení, geometrie stavby, hodnot pro extrémní a mimořádné situace atd.

**Výpočet :** + - [1]

---

Automaticky vybírat maxima Posouzení ve směru maximálního účinku

---

— Okrajové podmínky —

☐ Vetknutá v patě

— Okrajové podmínky v hlavě —

☐ Deformace  [mm]

☐ Pootočení  [mRad]

☒ Vyztužení piloty

Počet :  [ks]

Krytí :  [mm]

Profil :  [mm]

Stupně vyzt. : pilota

☒ Smyková výztuž

Profil :  [mm]

Vzdálenost :  [mm]

— Výsledky —

SMYK : **VYHOVUJE** (55.9%)

OHYB A TLAK : **VYHOVUJE** (96.4%)

Stupně vyztužení : **VYHOVUJE** (25.3%)

---

— Informace —

**Maximální vnitřní síly a deformace:**

Max.deformace piloty = 18.2 mm

Max.posouvající síla = 273.10 kN

Maximální moment = 1934.00 kNm

Obr. 2.8: Posouzení na ohyb piloty z programu Geo5

### 3 ZÁVĚR

Výstupem práce je program schopný shodných výsledků s komerčním systémem Geo5 a Scia v rámci posudku vertikálně zatížené piloty dle 2. mezního stavu a dále výpočtu vnitřních sil v pilotě v pružném podloží.

Jsme si vědomi několika nedostatků v designu programu, vstupních částí a uživatelské náročnosti, avšak program samotný splnil hlavní cíl autora této práce spojením několika oborů znalostí do jednoho funkčního celku.

Program pro výpočet byl ověřen na několika příkladech z literatury a na výpočtu provedeném na reálné situaci, který byl porovnán s analytickým výpočtem a výstupem z programu Geo5. Výstupy programu jsou v rozmezí rozptylu uvažovaných hodnot a za úvahy zkresleného odečtu z grafů přijatelné.

Z praktické části si odnášíme potřebu doplňovat veškeré geotechnické výpočty co nejpodrobnějším výzkumem in situ. Tabulkové hodnoty jsou neodstatečné a parametry zemin v nich obsažené jsou v obrovském rozptylu.

Na úkor drahých, náročných statických zkoušek, které mnohem přesněji vystihují chování plánovaných pilot je do budoucna možná cesta směrem dynamických penetračních zkoušek.

Nabyté nalosti z oboru numerické analýzy a MKP by bylo vhodné v budoucnu rozšířit do formy použitelné v praxi, naučit se pracovat s 2D prvky a zavést numerickou metodu výpočtu matic tuhosti. Dále by bylo záhodno doplnit výpočet piloty o návrh betonářské výztuže a zavést návrhové přístupy jako volbu bez nutnosti předem upravovat vstupní, nebo dodatečně upravovat výstupní parametry. Nabízí se také možnost různých způsobů výpočtu pružného podloží, případně zavedení nelinearit s vyloučením pružin s dosaženou únosností podloží.

# LITERATURA

- [1] MASOPUST, Jan. Navrhování základových a pažicích konstrukcí: příručka k ČSN EN 1997. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2012. ISBN 978-80-87438-31-2.
- [2] MASOPUST, Jan. *Vrtané piloty*. Praha: Čeněk a Ježek, 1994. ISBN 80-238-2755-3.
- [3] Ondřej Jiroušek. *Metoda konečných prvků: poznámky k přednáškám* [online]. Praha: ČVUT, 2006 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <[http://mech.fd.cvut.cz/members/jirousek/download/k618y2m2/ymkp\\_fem-2on1.pdf](http://mech.fd.cvut.cz/members/jirousek/download/k618y2m2/ymkp_fem-2on1.pdf)>
- [4] PyQt5. Reference Guide [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: <http://pyqt.sourceforge.net/Docs/PyQt5/>
- [5] Numpy and Scipy. Documentation [online]. [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: <https://docs.scipy.org/doc/>
- [6] Matplotlib. Docs [online]. [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: <https://matplotlib.org/contents.html>
- [7] Geo5. Online nápověda [online]. [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: <https://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/teorie-01/>
- [8] WEIGLOVÁ, Kamila. *Mechanika zemin*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-507-5.
- [9] ČSN 73 1001. *Zakládání staveb: základová půda pod plošnými základy*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1988.
- [10] Eurokód 7: *navrhování geotechnických konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [11] Python/C API. Reference Manual [online]. [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <https://docs.python.org/2/c-api/index.html>
- [12] Conda. User manual [online]. [cit. 2017-11-11]. Dostupné z: <https://conda.io/docs/>
- [13] DAVIS, E. H. a H. G. POULOS. *Pile Foundation Analysis and Design*. 1980. New York: John Wiley, 1980. Series in Geotechnical Engineering. ISBN 04-710-9956-2.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$U_{vd}$	svislá návrhová únosnost piloty
$U_{bd}$	návrhová únosnost paty piloty
$U_{fd}$	návrhová únosnost na plášti piloty
$V_d$	svislá složka návrhového zatížení působícího v hlavě piloty
$q_{si}$	plášťové tření i-té vrstvy
$a, b, c, d$	regresní koeficienty
$D_i$	hloubka od hlavy piloty do středu i-té vrstvy
$d_i$	průměr piloty v i-té vrstvě
$l$	celková délka piloty
$l_i$	mocnost i-té vrstvy
$\pi$	Ludolfovo číslo či Archimédova konstanta
$R_{su}$	výpočtová hodnota mezní síly na plášti
$m_1$	koeficient podle druhu zatížení
$m_2$	koeficient vlivu eventuální ochrany dříku piloty
$q_p$	napětí na patě piloty
$d_p$	průměr paty piloty
$\overline{q_s}$	průměrné plášťové tření
$\beta$	koeficient přenosu zatížení do paty piloty
$R_y$	zatížení na mezi plného plášťového tření
$s_y$	sedání na mezi plného plášťového tření
$I$	příčinkový koeficient sedání piloty
$\overline{d}$	vážený průměr profilů piloty
$\overline{E_s}$	průměrná hodnota sečnového modulu deformace zemin podél dříku piloty

$E_{si}$	Hodnota sečnového modulu deformace zemin podél dřívku piloty
$I_1$	základní příčinkový koeficient
$R_k$	korekční součinitel tuhosti piloty
$R_{bu}$	únosnost piloty při mezním sednutí 25 mm
$R_{pu}$	Jak to přesně nazvat?
$I_d$	index relativní ulehlosti
$I_c$	stupeň konzistence
$I_p$	index plasticity
$v_{ij}$	posunutí ve směru osy y
$\phi_{ij}$	pootočení koncových průřezů
$Q_k$	Nápravové síly
$q_{ik}$	Rovnoměrné zatížení
$w$	Šířka vozovky
$n_l$	Počet zatěžovacích pruhů
$w_l$	Šířka zatěžovacího pruhu

# SEZNAM PŘÍLOH


<b>A</b>	<b>Geologicko-inženýrský průzkum</b>	<b>49</b>
A.1	Geotechnický profil vrtu JV-164 . . . . .	49
A.2	Interpretace výsledků dynamické penetrace DP-163 . . . . .	50
A.3	Interpretace výsledků dynamické penetrace DP-165 . . . . .	51
<b>B</b>	<b>Výstupy z laboratorních zkoušek</b>	<b>52</b>
B.1	Mechanické vlastnosti zemin . . . . .	52
B.2	Fyzikální vlastnosti zemin . . . . .	53
B.3	Stanovení stlačitelnosti v edometru . . . . .	54
B.4	Krabicová smyková zkouška str. 1/3 . . . . .	55
B.5	Krabicová smyková zkouška str. 2/3 . . . . .	56
B.6	Krabicová smyková zkouška str. 3/3 . . . . .	57
<b>C</b>	<b>Zatížení</b>	<b>58</b>
C.1	Spojité nosník - mostovka . . . . .	58
C.2	Konzole . . . . .	59
<b>D</b>	<b>Obsah přiloženého archivu</b>	<b>60</b>



# A GEOLOGICKO-INŽENÝRSKÝ PRŮZKUM

## A.1 Geotechnický profil vrtu JV-164

GEOTECHNICKÝ PROFIL VRTU														
AKCE:						SONDA:								
DATUM VRTÁNÍ: 03.12.2012						X - JTSK (m): 1085787.6								
SOUPRAVA: H-50						Y - JTSK (m): 496397.55								
ZPŮSOB VRTÁNÍ: jádrový						Z (m n.m.): 258.99								
VRTMISTR: Šumský						Z pažnice (m n.m.):								
Měřítka 1:100														
m. n. m.	m. p. t.	zeminy a horniny	odběr vzorků	hladina podz. vody schéma výstrojení	ČSN 736133	ČSN EN ISO 14688-2	těžitelnost ČSN 736133	namrzavost	vhodnost pro podloží	vhodnost do násypu	tr. vrstevnost	geotechnický typ	stratigrafie	pojmenování a popis zemín a hornin - terénní popis
259	0				MSO	Or	I	NN	NV	NV	I	1o	Qh	0.0 - 0.4 ORNICE: humózní hlína, tmavě hnědá, písčitá, měkká
258	1				F3 MS	orSi	I	NN	NV	NV	I	1f	Qh	0.4 - 1.2 HLÍNA PÍŠČITÁ: fluvialní, organická, tmavě hnědá, tuhá
257	2				F3 MS	orSi	I	NN	NV	NV	I	1f	Qh	1.2 - 1.5 HLÍNA PÍŠČITÁ: fluvialní, silně organická, černohnědá, písčitá, tuhá
256	3				F4 CS	saSi	I	NN	NV	PV	I	2g	Qp	1.5 - 1.7 JIL PÍŠČITÝ: fluvialní, tmavě šedý, silně písčité, měkký až kašovitý
255	4				F6 CL	dSi	I	NN	NV	PV	I	1f	Qp	1.7 - 2.3 PÍSEK JILOVITÝ: fluvialní, jemný, šedý, silně nasycený, s ojedinělými valouny velikosti do 5 mm, středně ulehlý
254	5				F4 CS	saSi	I	NN	PV	PV	I	1f	Qp	2.3 - 2.4 JIL SE STŘEDNÍ PLASTICITOU: (jilovitý prach), fluvialní, modrošedý, měkký
253	6				S5 SC	sidSa	I	MN	PV	PV	I	2g	Qp	2.4 - 2.8 JIL PÍŠČITÝ: organický, černohnědý, měkký, zbytky dřeva
252	7				F4 CS	saCl	I	NN	PV	PV	I	1f	Qp	2.8 - 3.6 PÍSEK JILOVITÝ: fluvialní, šedý až tmavě šedý, jemný, s ojedinělými valouny velikosti 2 cm, středně ulehlý, silně nasycený
251	8				S3 S-F	siSa	I	MN	PV	V	I	2g	Qp	3.6 - 4.4 JIL PÍŠČITÝ: fluvialní, hnědý do 4.0 m, níže je hnědošedý, silně písčité (až jilovitý písek), měkký až kašovitý, organický
250	9				G3 G-F	saGr	I	MN	V	V	I	3fu	Qp	4.4 - 4.8 PÍSEK S PRÍMĚSÍ JEMNOZRNĚ ZEMINY: (prachovitý písek), glaciufuviální, jemný, žlutohnědý, silně zvodnělý, středně ulehlý
249	10				S3 S-F	siSa	I	MN	PV	PV	I	2g	Qp	4.8 - 5.0 ŠTĚRK S PRÍMĚSÍ JEMNOZRNĚ ZEMINY: (písčité štěrky), glaciufuviální, šedý, valouny křemene o velikosti 1-5 cm, silně písčité, středně ulehlý
248	11				G3 G-F	saGr	I	MN	V	V	II	3fu	Qp	5.0 - 5.2 PÍSEK S PRÍMĚSÍ JEMNOZRNĚ ZEMINY: (prachovitý písek), glaciufuviální, jemný, žlutohnědý, silně nasycený
247	12				S5 SC	siSa	I	MN	PV	PV	I	2g	Qp	5.2 - 5.7 ŠTĚRK S PRÍMĚSÍ JEMNOZRNĚ ZEMINY: (písčité štěrky), glaciufuviální, bělošedý, valouny křemene opracované o velikosti 2-5cm (50%), písčité, středně ulehlé, vlhké
246	13				F6 CL	siCl	I	MN	NV	PV	I	1f	Qp	5.7 - 6.0 PÍSEK JILOVITÝ: (prachovitý písek), glaciufuviální, jemný, světle hnědý, středně ulehlý
245	14				S3 S-F	siSa	I	MN	PV	PV	I	2g	Qp	6.0 - 6.2 JIL SE STŘEDNÍ PLASTICITOU: (prachovitý jíl), glaciufuviální, žlutohnědý, tuhý
244	15				F4 CS	saSi	I	NN	PV	PV	I	1f	Qp	6.2 - 6.6 PÍSEK S PRÍMĚSÍ JEMNOZRNĚ ZEMINY: (prachovitý písek), jemný až střední, s valouny křemene o velikosti 5-6 cm, silně nasycený, středně ulehlý
243	16				G5 GC	sidGr	I	MN	PV	PV	I	3fu	Qp	6.6 - 6.8 JIL PÍŠČITÝ: glaciufuviální, hnědý až žlutohnědý, měkký
242	17				S5 SC	siSa	I	MN	PV	PV	I	2g	Qp	6.8 - 7.1 ŠTĚRK JILOVITÝ: glaciufuviální, hnědý, valouny o velikosti 1-5 cm, navlhlý až vlhký, středně ulehlý
241	18													7.1 - 7.9 PÍSEK JILOVITÝ: (prachovitý písek), glaciufuviální, světle hnědý, jemný, s ojedinělými valouny křemene o velikosti do 5 mm, místy 1-2 cm, silně zvodněný, středně ulehlý
240	19													7.9 - 15.0 JIL S VYSOKOU PLASTICITOU: (prachovitý jíl), marinní, šedý, vápnitý, tuhý do 9.0 m, níže je pevný, místy jsou úlomky zvětralých jílovců do 7 cm
239	20													
238	21													



**G-Consult, spol. s r.o.**  
Trocnovská 794/9  
702 00 Ostrava  
Tel.: +420 597 430 911  
www.g-consult.cz

Dokumentoval:  
H.Zoglobossou  
03.12.2012

Naražená hladina - m p.t. (m n.m.): 1.6 (257.4)  
Ustálená hladina - m p.t. (m n.m.): 1.5 (257.5)



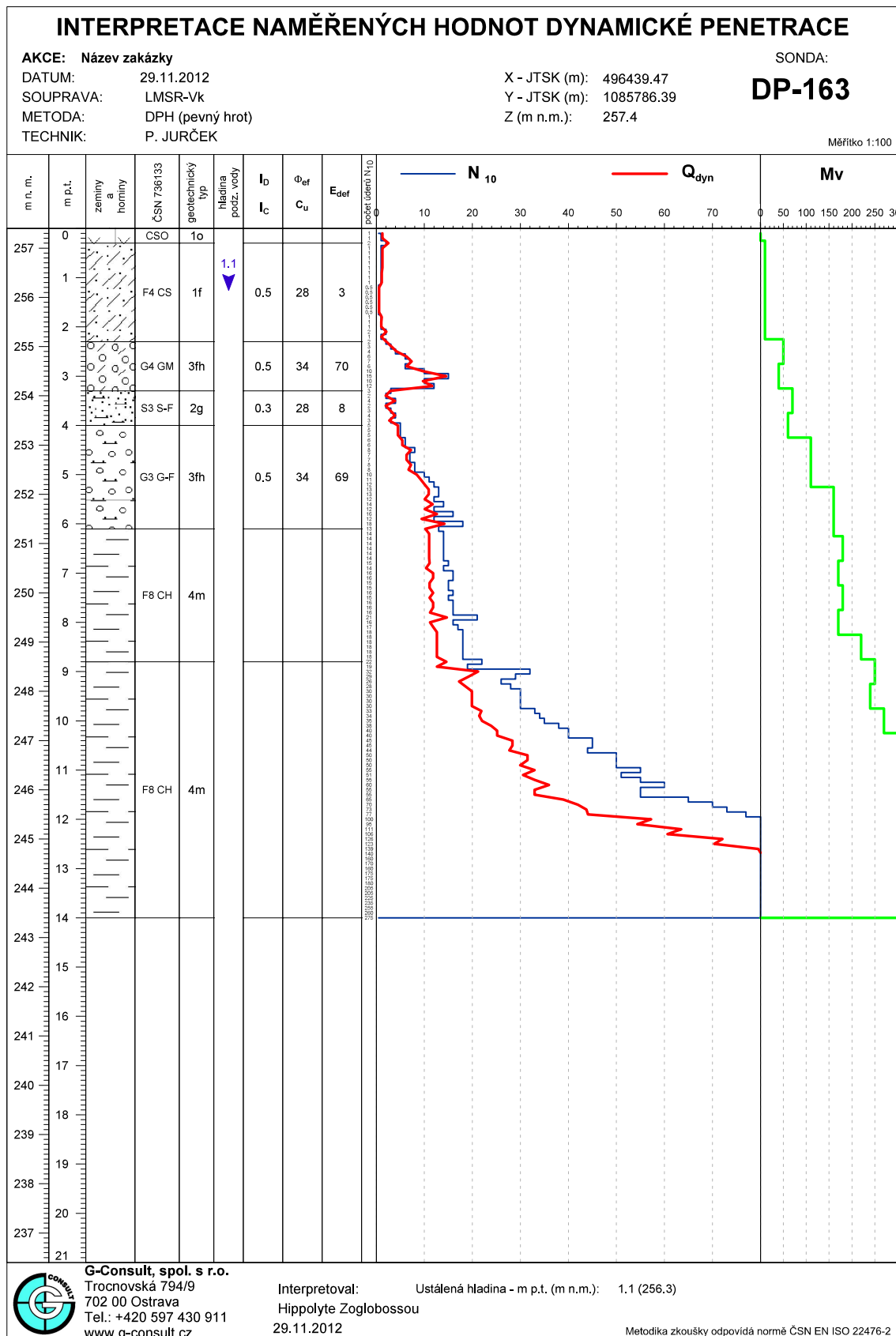
G-Consult, spol. s r.o.  
Trocnovská 794/9  
702 00 Ostrava  
Tel.: +420 597 430 911  
www.g-consult.cz

Dokumentoval:  
H.Zogloboosou  
03.12.2012

Naražená hladina - m p.t. (m n.m.): 1.6 (257.4)  
Ustálená hladina - m p.t. (m n.m.): 1.5 (257.5)

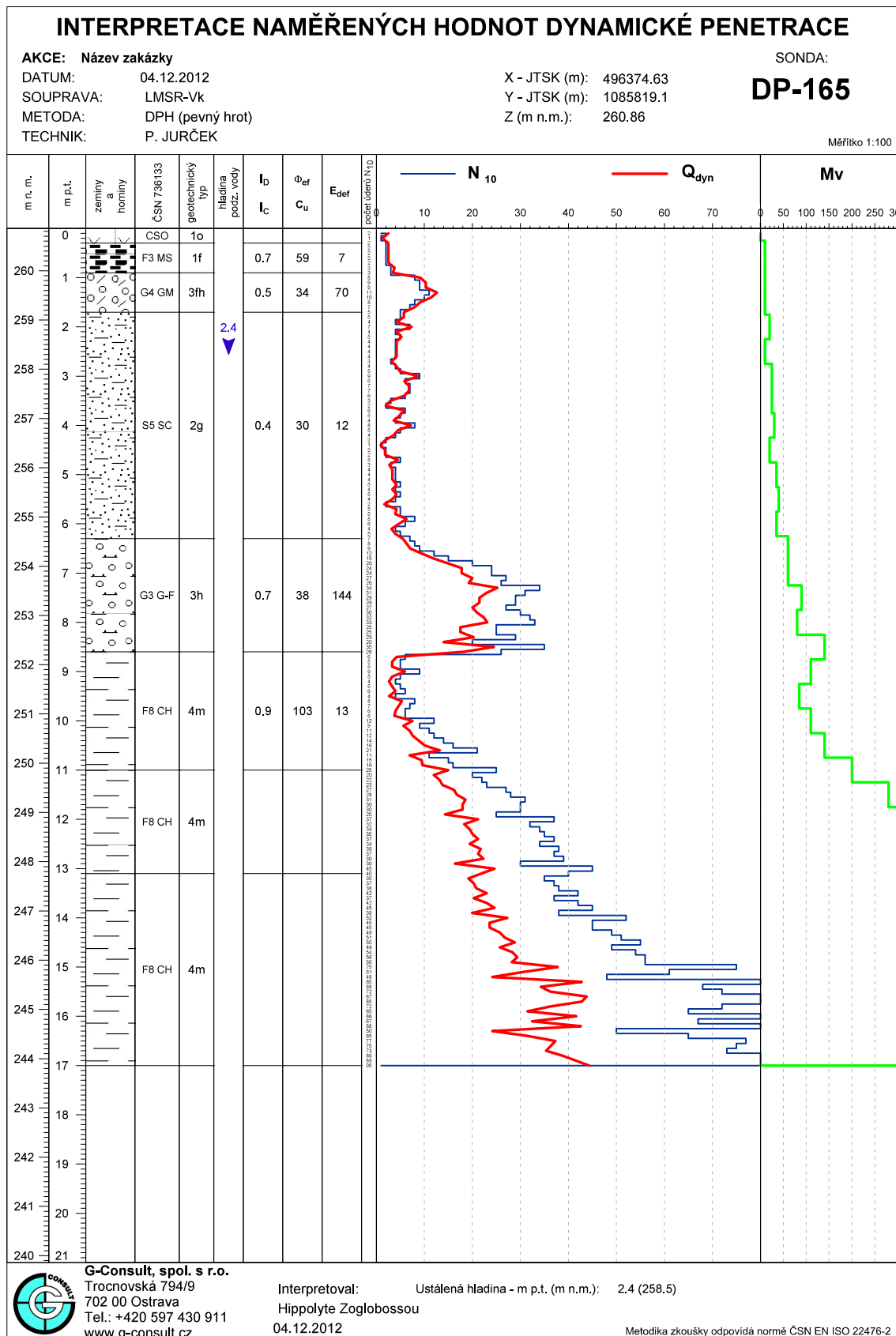
## A.2 Interpretace výsledků dynamické penetrace

### DP-163



## A.3 Interpretace výsledků dynamické penetrace

### DP-165



# B VÝSTUPY Z LABORATORNÍCH ZKOUŠEK

## B.1 Mechanické vlastnosti zemin

UNIGEO a.s.  
Středisko laboratoře mechaniky zemin  
OSTRAVA - HRABOVÁ

### TABELÁRNÍ PŘEHLED VÝSLEDKŮ - MECHANICKÉ VLASTNOSTI ZEMIN

Název zakázky :	Silnice I/11 Opava, Severní obchvat - Západní část						List č. :	1
Číslo zakázky :	Z 512208						Datum :	18.12.2012
Lab. číslo ZA -	37930	37933	37934	37939	37940	37942		
Sonda	JV-134	JV-139	JV-140	JV-160	JV-162	JV-164		
Hloubka [ m ]	15,0-15,2	10,0-10,2	14,5-14,7	7,5-7,7	8,5-8,7	9,5-9,7		
Druh vz.	N	N	N	N	N	N		
Roed Rekonsoi. přitížení [ MPa ]	0,300	0,200	0,290	0,150	0,170	0,190		
Roed [ MPa ]	15,03	10,99	14,05	11,88	7,83	16,84		
Roed <sub>1</sub> [ MPa ]	14,37	10,63	10,61	15,97	5,95	20,12		
Roed <sub>2</sub> [ MPa ]	14,37	9,78	13,73	10,08	7,27	17,16		
Roed <sub>3</sub> [ MPa ]	15,76	11,93	16,99	11,44	9,77	15,44		
cv <sub>1</sub> [ m <sup>2</sup> /s ]								
cv <sub>2</sub> [ m <sup>2</sup> /s ]								
cv <sub>3</sub> [ m <sup>2</sup> /s ]								
φ <sub>ef</sub> [ ° ]	20,50	24,70		21,50		23,40		
c <sub>ef</sub> [ kPa ]	24,5	20,5		22,5		19,3		
φ <sub>u</sub> [ ° ]					5,58			
c <sub>u</sub> [ kPa ]					34,4			
Koeficient Z								
σ <sub>c</sub> [ MPa ]								
σ <sub>pt</sub> [ MPa ]								
σ <sub>ptp</sub> [ MPa ]								

Tento Tabelární přehled není součástí akreditace.

UNIGEO a.s.

30

Místecká 329/250, 720 00 Ostrava-Hrabová  
DIČ: CZ45192360  
Divize SANIEKO  
středisko laboratoře mechaniky zemin

*metasun*

## B.2 Fyzikální vlastnosti zemin

**UNIGEO a.s.**  
**Středisko laboratoře mechaniky zemin**  
**OSTRAVA - HRABOVÁ**

## TABELÁRNÍ PŘEHLED VÝSLEDKŮ - FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI ZEMIN

[illegible]

Výsledky jsou uvedeny s následujícími nejistotami:	$W_n: \pm 0,30\%$	$W_p: \pm 1,0\%$	$\rho_s: \pm 0,01 \text{ Mg/m}^3$	$W_{opt}: \pm 0,40\%$
	$W_l: \pm 1,0\%$	$\rho_l: \pm 0,02 \text{ Mg/m}^3$	$\rho_{l,max}: \pm 0,01 \text{ Mg/m}^3$	

Uvedené rozšířené standardní nejistoty jsou součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření  $k=2$ , což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95%. Nejistoty nezohledňují vliv výběru a nehomogenity vzorku.

Tento Tabulární přehled není součástí akreditace.

30	<p>Mateřská 329/358, 720 00 Olomouc-Hrabov</p> <p>DIC: CZ43192360</p> <p>DIVOK SANIEK</p> <p>číslo účtu kategorie 09 poskytnutí v rámci</p>	<p><i>Průhanka</i></p>
----	---	------------------------

## B.3 Stanovení stlačitelnosti v edometru



Středisko laboratoře mechaniky zemín,  
akreditovaná laboratoř č. 1412  
Mistická 329/258  
720 00 OSTRAVA - HRABOVÁ

stránka 1 z 1

PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 37942 - E

### STANOVENÍ STLAČITELNOSTI ZEMIN V EDMETRU

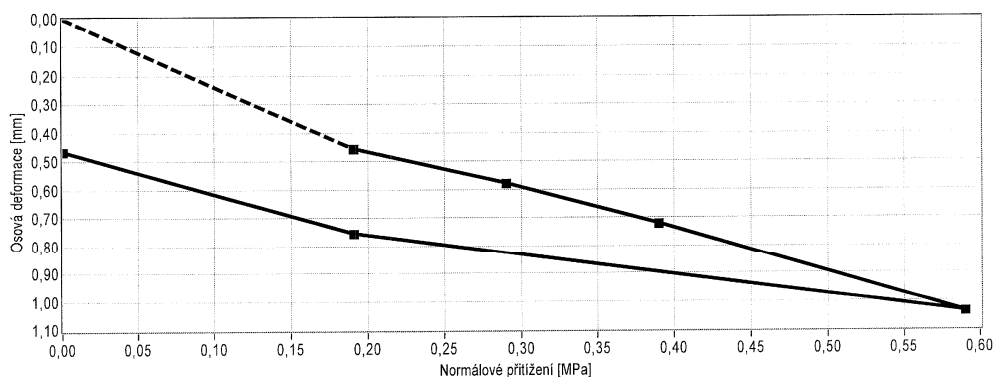
Rekonsolidovaný zkušební vzorek

#### Základní údaje o zkoušce

**Metoda:** Stanovení stlačitelnosti zemín v edometru, MPPZ 09 (ČSN CEN ISO/TS 17892-5)  
**Zkoušená položka:** zemina  
**Název a adresa zákazníka:** G-Consult s.r.o., Trocnovská 794/9, 702 00 Ostrava-Přivoz  
**Název zakázky:** Silnice I/11 Opava, Severní obchvat - Západní část číslo úkolu: Z 512208  
**Datum přijetí vzorku:** 07.12.2012  
**Číslo vzorku:** ZA-37942  
**Sonda:** JV-164  
**Hloubka:** 9,50 m - 9,70 m  
**Popis vzorku:** Šedý jíł  
**Rozměry vzorku:** Průměr 100,00 mm Výška 25,00 mm  
**Příprava vzorku:** Neporušený **Typ zkoušky:** A **Zaliti** ☐

Fyzikální vlastnosti vzorku	Před měřením	Při maximu	Po měření
Váhová vlhkost [%]	27,68	26,43	27,94
Objemová vlhkost [%]	42,02	41,87	43,23
Objemová hm. za mokra [Mg/m <sup>3</sup> ]	1,94	2,00	1,98
Objemová hm. za sucha [Mg/m <sup>3</sup> ]	1,52	1,58	1,55
Pórovitost [%]	44,79	42,40	43,75
Stupeň nasycení [-]	0,94	0,99	0,99
Zdánlivá hustota částic [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,75		

#### Přetvárné charakteristiky vzorku



Zatěžovací stupeň 0,19 - 0,29 MPa : Eoed1 = 20,12 MPa

Zatěžovací stupeň 0,29 - 0,39 MPa : Eoed2 = 17,16 MPa

Zatěžovací stupeň 0,39 - 0,59 MPa : Eoed3 = 15,44 MPa

**Celý obor platnosti (0,19 - 0,59 MPa): Eoed = 16,84 MPa**

Nejistoty měření:

Váhová vlhkost:  $\pm 0,3\%$ ; objemová hmotnost za mokra:  $\pm 0,02$  Mg/m<sup>3</sup>; zdánlivá hustota částic:  $\pm 0,01$  Mg/m<sup>3</sup>; Eoed:  $\pm 0,2$  MPa

Uvedené rozšířené standardní nejistoty jsou součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření  $k = 2$ , což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %. Nejistoty nezohledňují vlivy odběru a nehomogenity vzorku.

**Vypracoval:** Ing. Karel Slavík

**Schválil:** Ing. Lenka Smetanová, vedoucí Střediska laboratoře mechaniky zemín

Datum provedení zkoušky: 10.12.2012

Zkušební protokol nesmí být bez písemného souhlasu laboratoře reprodukován jinak než celý. Výsledek každé uvedené zkoušky se týká pouze vzorku výše uvedeného laboratorního čísla.



## B.4 Krabicová smyková zkouška str. 1/3



Středisko laboratoře mechaniky zemín,  
akreditovaná laboratoř č. 1412  
Mistecská 329/258  
720 00 OSTRAVA - HRABOVÁ.

stránka 1 z 3

PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 37942 - S

### KRABICOVÁ SMYKOVÁ ZKOUŠKA

Konsolidovaný odvodněný zkušební vzorek

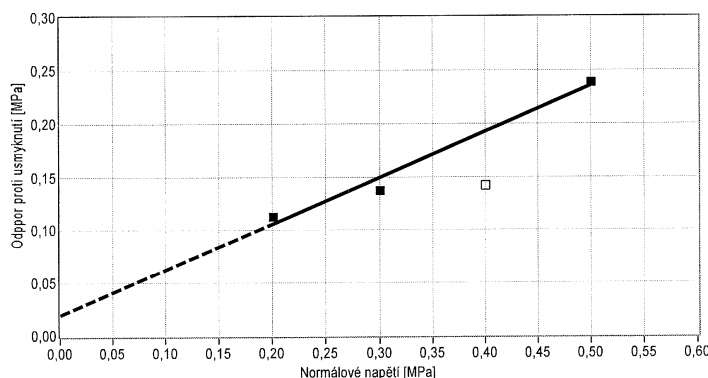
#### Základní údaje o zkoušce

**Metoda:** Krabicová smyková zkouška, MPPZ 10 (ČSN CEN ISO/TS 17892-10)  
**Zkoušená položka:** zemina  
**Název a adresa zákazníka:** G-Consult s.r.o., Trocnovská 794/9, 702 00 Ostrava-Přívov  
**Název zakázky:** Silnice I/11 Opava, Severní obchvat - Západní část číslo úkolu: Z 512208  
**Datum přijetí vzorku:** 07.12.2012  
**Číslo vzorku:** ZA-37942  
**Sonda:** JV-164  
**Hloubka:** 9,50 m - 9,70 m  
**Popis vzorku:** Šedý jíl  
**Rozměry vzorku:** Hrana 84,00 mm Výška 20,00 mm  
**Příprava vzorku:** Neporušený **Zalití** ☒  
**Rychlost posunu:** 0,030 mm/min

#### Fyzikální vlastnosti vzorku

Váhová vlhkost	27,93 [%]	Pórovitost	44,86 [%]
Objemová vlhkost	42,35 [%]	Stupeň nasycení	0,95 [-]
Objemová hm. za mokra	1,94 [Mg/m <sup>3</sup> ]	Zdánlivá hustota částic	2,75 [Mg/m <sup>3</sup> ]
Objemová hm. za sucha	1,52 [Mg/m <sup>3</sup> ]		

#### Efektivní parametry vrcholové smykové pevnosti



Normálové napětí [MPa]	Smykové napětí [MPa]
0,200	0,11
0,300	0,14
0,400	0,14
0,500	0,24

Poznámka:

Měření na krabici 3 (Normálové napětí 0,40 MPa) bylo vyloučeno, protože nespĺňuje podmínky kap. 5.2.5 normy ČSN 72 1030.

**Úhel smykové pevnosti** 23,4 °  
**Soudržnost zeminy** 19,3 kPa  
**Obor platnosti** 0,20 MPa - 0,50 MPa

Nejistoty měření:

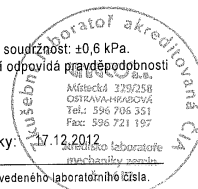
Váhová vlhkost:  $\pm 0,3$  %; objemová hmotnost za mokra:  $\pm 0,02$  Mg/m<sup>3</sup>; zdánlivá hustota částic:  $\pm 0,01$  Mg/m<sup>3</sup>; úhel smykové pevnosti:  $\pm 0,5^\circ$ ; soudržnost:  $\pm 0,6$  kPa.  
 Uvedené rozšířené standardní nejistoty jsou součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření  $k = 2$ , což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %. Nejistoty nezohledňují vlivy odběru a nehomogenity vzorku.

**Vypracoval:** Ing. Karel Slavík

**Schválil:** Ing. Lenka Smetanová, vedoucí Střediska laboratoře mechaniky zemín

**Datum provedení zkoušky:** 17.12.2012

Zkušební protokol nesmí být bez písemného souhlasu laboratoře reprodukován jinak než celý. Výsledek každé uvedené zkoušky se týká pouze vzorku výše uvedeného laboratorního čísla.



## B.5 Krabicová smyková zkouška str. 2/3



Středisko laboratoře mechaniky zemín,  
akreditovaná laboratoř č. 1412  
Místecká 329/258  
702 00 OSTRAVA - HRABOVÁ.

stránka 2 z 3

PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 37942 - S

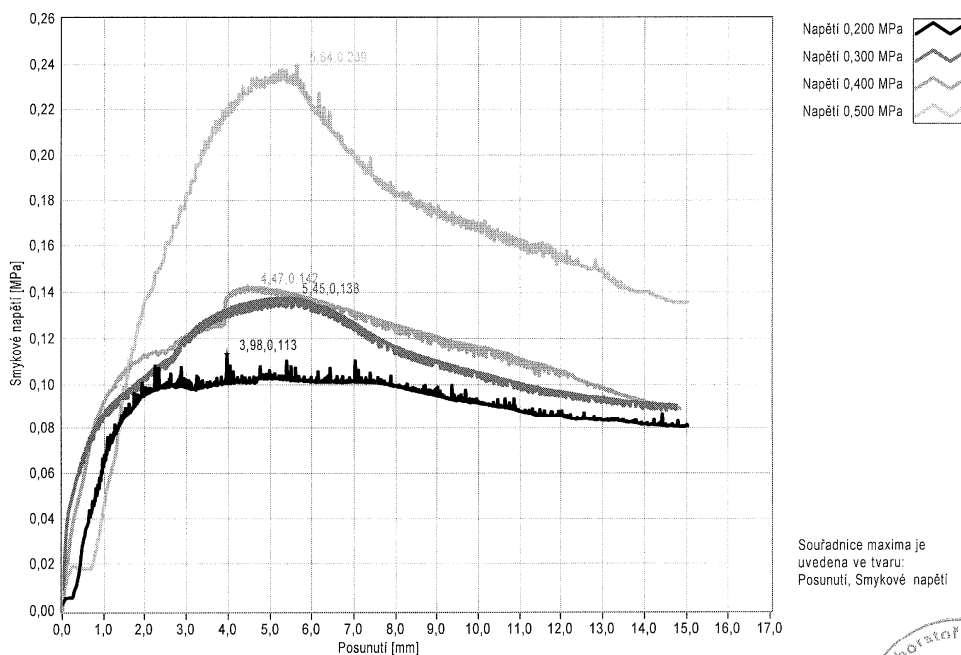
### KRABICOVÁ SMYKOVÁ ZKOUŠKA

Konsolidovaný odvodněný zkušební vzorek

#### Základní údaje o zkoušce

<b>Metoda:</b>	Krabicová smyková zkouška, MPPZ 10 (ČSN CEN ISO/TS 17892-10)		
<b>Zkoušená položka:</b>	zemina		
<b>Název a adresa zákazníka:</b>	G-Consult s.r.o., Trocnovská 794/9, 702 00 Ostrava-Přívoz		
<b>Název zakázky:</b>	Silnice I/11 Opava, Severní obchvat - Západní část číslo úkolu: Z 512208		
<b>Datum přijetí vzorku:</b>	07.12.2012		
<b>Číslo vzorku:</b>	ZA-37942		
<b>Sonda:</b>	JV-164		
<b>Hloubka:</b>	9,50 m - 9,70 m		
<b>Popis vzorku:</b>	Šedý jíl		
<b>Rozměry vzorku:</b>	Hrana	84,00 mm	Výška 20,00 mm
<b>Příprava vzorku:</b>	Neporušený		Zalití <input checked="" type="checkbox"/>
<b>Rychlost posunu:</b>	0,030	mm/min	

#### Závislost smykového napětí na posunutí



Vypracoval: Ing. Karel Slavík

Schválil: Ing. Lenka Smetanová, vedoucí Střediska laboratoře mechaniky zemín

Datum provedení zkoušky: 17.12.2012

Zkušební protokol nesmí být bez písemného souhlasu laboratoře reprodukován jinak než celý. Výsledek každé uvedené zkoušky se týká pouze vzorku výše uvedeného laboratorního čísla, 1412





## B.6 Krabicová smyková zkouška str. 3/3



Středisko laboratoře mechaniky zemín,  
akreditovaná laboratoř č. 1412  
Místecká 329/258  
720 00 OSTRAVA - HRABOVÁ.

stránka 3 z 3

PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 37942 - S

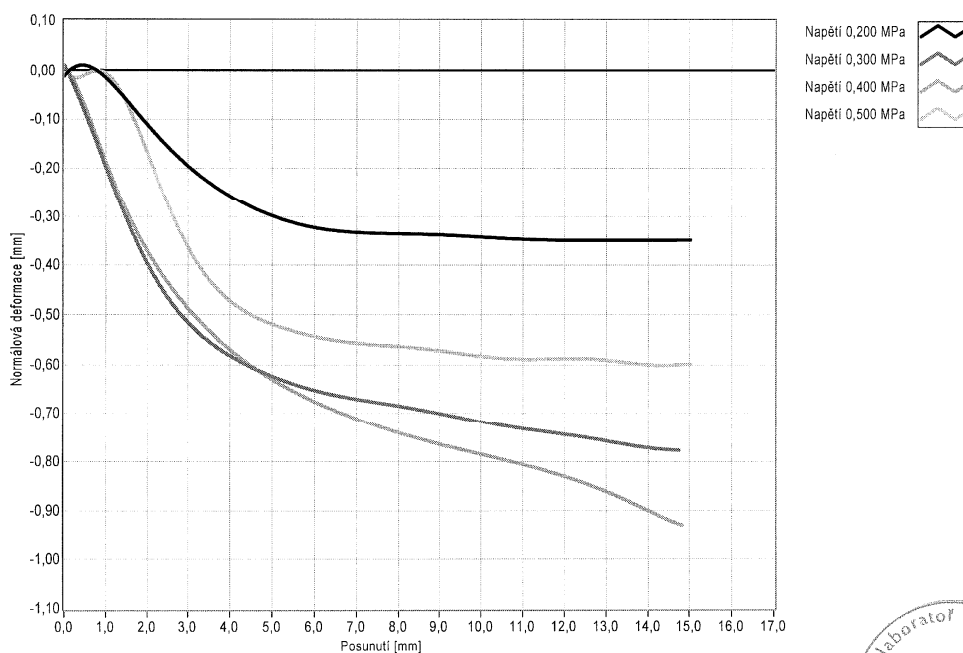
### KRABICOVÁ SMYKOVÁ ZKOUŠKA

Konsolidovaný odvodněný zkušební vzorek

#### Základní údaje o zkoušce

<b>Metoda:</b>	Krabicová smyková zkouška, MPPZ 10 (ČSN CEN ISO/TS 17892-10)		
<b>Zkoušená položka:</b>	zemina		
<b>Název a adresa zákazníka:</b>	G-Consult s.r.o., Trocnovská 794/9, 702 00 Ostrava-Přívov		
<b>Název zakázky:</b>	Silnice I/11 Opava, Severní obchvat - Západní část číslo úkolu: Z 512208		
<b>Datum přijetí vzorku:</b>	07.12.2012		
<b>Číslo vzorku:</b>	ZA-37942		
<b>Sonda:</b>	JV-164		
<b>Hloubka:</b>	9,50 m - 9,70 m		
<b>Popis vzorku:</b>	Šedý jíl		
<b>Rozměry vzorku:</b>	Hrana 84,00 mm	Výška 20,00 mm	
<b>Příprava vzorku:</b>	Neporušený	Zaliti <input checked="" type="checkbox"/>	
<b>Rychlost posunu:</b>	0,030 mm/min		

#### Závislost normálové deformace na posunutí



Vypracoval: Ing. Karel Slavík

Schválil: Ing. Lenka Smetanová, vedoucí Střediska laboratoře mechaniky zemín

Datum provedení zkoušky: 17.12.2012



Zkušební protokol nesmí být bez písemného souhlasu laboratoře reprodukován jinak než celý. Výsledek každé uvedené zkoušky se týká pouze vzorku výše uvedeného laboratorního čísla.

## C ZATÍŽENÍ

### C.1 Spojitý nosník - mostovka

#### 1. Reakce

Lineární výpočet, Extrém : Uzel

Výběr : Sn5

Kombinace : CO2

Podpora	Stav	Rx [kN]	Rz [kN]	My [kNm]
Sn5/N3	CO2/1	0.00	8295.94	0.00
Sn5/N3	CO2/4	0.00	5987.29	0.00
Sn5/N3	CO2/5	0.00	10727.74	0.00

#### 2. Klíč kombinace

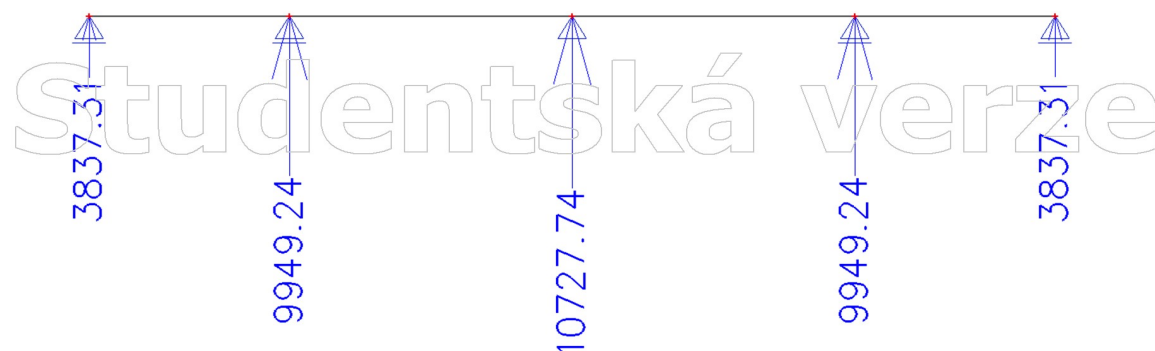
Klíč kombinace

Jméno	Popis kombinací
1	ZS1*1.35
2	ZS1*1.00
3	ZS1*1.35 + ZS2*0.54
4	ZS1*1.00 + Proměnné TS-UL-LS1-Min Rz*1.35
5	ZS1*1.15 + ZS2*1.35 + Proměnné TS-UL-LS1-Max Rz*1.35

#### 3. Skupiny výsledků

Jméno	Výpis
Všechny MSU	CO1 - EN-MSÚ (STR/GEO) Soubor B
	CO2 - EN-MSÚ (STR/GEO) Soubor B

#### 4. Reakce; Rx, Ry, Rz, Mx, My, Mz



## C.2 Konzole

### 1. Reakce

Lineární výpočet

Kombinace: CO1

Systém: Globální

Extrém: Globální

Výběr: Vše

**Uzlové reakce**

Jméno	Stav	$R_x$ [kN]	$R_z$ [kN]	$M_y$ [kNm]	$e_y$ [mm]
Sn1/N1	CO1/1	-300.00	11496.08	-3869.54	-336.6

Jméno	KLíč kombinace
CO1/1	1.35*ZS1 + ZS2

### 2. Skupiny výsledků

Jméno	Výpis
Všechny MSU	CO1 - Obálka - únosnost

### 3. Reakce; $R_x$ ; $R_z$ ; $M_y$

Hodnoty:  $R_x$ ,  $R_z$ ,  $M_y$

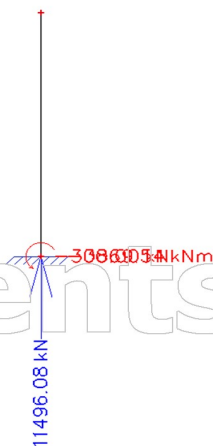
Lineární výpočet

Kombinace: CO1

Systém: Globální

Extrém: Globální

Výběr: Vše



Studentská verze

## D OBSAH PŘILOŽENÉHO ARCHIVU

Přiložený archiv obsahuje práci psanou v  $\text{\LaTeX}$ , dodatečné soubory vytvořené při vypracovávání práce a zdrojový kód vytvořeného programu.

Struktura archivu je následující:

```
/ ..... kořenový adresář přiloženého archivu
├── AGeo ..... vlastní kód programu
│   ├── sqldrivers ..... ovladače databáze
│   ├── ui ..... soubory grafického rozhraní
│   └── výsledky ..... grafické výstupy z programu
├── LaTeX ..... soubory pro tisk a sazbu diplomové práce
├── AGeo.rar ..... Spustitelná verze programu
└── Tvarové funkce.wmx ..... Maxima script pro výpočet tuhosti prvku
```